(Aus dem physiologischen Institut der Universität Göttingen.)

Über die reversible und irreversible Aufhebung der Erregbarkeit des Froschmuskels durch Wasserentziehung.

(Mit 3 Textfiguren.)

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

in der

Medizin, Chirurgie und Geburtshilfe

der

hohen medizinischen Fakultät

der

Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von

H. C. Wiemeyer

aus Aerdenhout-Haarlem (Holland).

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Göttingen 1916.

Der medizinischen Fakultät der Universität Göttingen vorgelegt am 5. Juni 1916.

Referent: Professor Dr. Paul Jensen.

Die Drucklegung ist seitens der Fakultät genehmigt.

Über die reversible und irreversible Aufhebung der Erregbarkeit des Froschmuskels durch Wasserentziehung.

(Mit 3 Textfiguren.)

Inhaltsübersicht.

Seite

A. Fragestellung 4
B. Bemerkungen zur Literatur 5
C. Die Art der Koexistenz von Wasser, Kolloiden und Kristalloiden im Muskel 6
D. Gedankengang für die folgenden Untersuchungen 9
E. Experimenteller Teil 11
I. Allgemeine Methodik 11
II. Erste Versuchsreihe: Austrocknung an freier Luft bei Temperaturen zwischen 3° und 11° C. 12
III. Zweite Versuchsreihe: Wasserentziehung in einem abgeschlossenen Luftraum bei verschiedenen konstanten Dampfdrucken und bei Temperaturen zwischen 15° und 22° C. 16
a) Zur Methodik 16
b) Versuche und Ergebnisse 18
IV. Dritte Versuchsreihe: Wasserentziehung des gefrorenen Muskels in einem abgeschlossenen trocknen Luftraum teils mit, teils ohne hygroskopische Substanz bei konstanten Temperaturen zwischen — 0,8° und — 1,2° C. 22
a) Zur allgemeinen Methodik dieser Versuchsreihe 24
b) Zur Beantwortung zweier Vorfragen 30
1. Einfluss länger dauernden Gefrorenseins 30
2. Folgen länger dauernder Einwirkung kalter Ringerlösung . 34
c) Versuche und Ergebnisse 35
1. Vorversuche zur vorläufigen Orientierung 35
aa) Austrocknung des gefrorenen Muskels in lufthaltigen trocknen Gefässen, die in ein Kältebad von konstanter Temperatur versenkt waren 35
bb) Dasselbe in Gefässen mit P_2O_5 38

Seite
2. Austrocknung von gefrorenen Muskeln, die ohne Wasserabgabe zum Gefrieren gebracht waren 38
aa) Austrocknung in trockner Röhre 41
bb) Austrocknung über P_2O_5 41
α) Der ausgetrocknete Muskel wird nach dem Auftauen zur Erholung in Ringer-Lösung gebracht 41
β) Dem ausgetrockneten Muskel wird im gefrorenen Zustande durch unterkühlte Ringer-Lösung das Wasser ersetzt 42
F. Zusammenfassung 44

A. Fragestellung.

Das Wasser ist für den Muskel, der etwa 80 % von solchem enthält, von der grössten Bedeutung. Wir brauchen nur daran zu denken, dass die Lösung und Dissoziation seiner Kristalloide vom Wasser abhängt, ferner die Zuwanderung von Betriebsmaterial und die Abwanderung von Abfallstoffen, desgleichen die Zustandsänderungen seiner Kolloide und damit auch die Verbindungsmöglichkeiten von Kristalloiden und Kolloiden, sodann die osmotischen Druckdifferenzen als Grundlage elektrischer Potentialdifferenzen und wahrscheinlich auch der Erregungsleitung usw. Wir wissen, dass sich bei mässiger Verringerung des Wassergehaltes die Lebensprozesse des Muskels ändern. Hierüber verdanken wir Durig[1]) besonders eingehende Untersuchungen, die sich auf die Abhängigkeit der Erregbarkeit, des mechanischen Latenzstadiums der Muskelzuckung, des Kontraktionsverlaufes usw. von dem Wassergehalt der Muskeln beziehen, und ganz allgemein ist bekannt, dass bei grösseren Wasserverlusten die lebendigen Leistungen mehr und mehr abnehmen, bis endlich der Austrocknungstod erfolgt. Wieviel Wasser aber ein Muskel ohne erhebliche Schädigung entbehren kann, und bei welchem Grade des Wasserverlustes er dem Tode verfällt, auf diese Fragen fehlt bisher eine eindeutige Antwort. Sie bilden daher den Inhalt der folgenden Untersuchungen, und zwar wurde untersucht, in welchem Maasse einerseits die Lebenstätigkeit, andererseits die Lebensfähigkeit des Froschmuskels durch seinen Wassergehalt bedingt sei. Die Untersuchung der Abhängigkeit der Lebenstätigkeit vom Wassergehalt bestand darin, dass geprüft wurde, in welcher Weise

1) A. Durig, Wassergehalt und Organfunktion. Pflüger's Arch. Bd. 85 S. 401. 1901; Bd. 87 S. 42. 1901; Bd. 92 S. 222. 1902.

die Erregbarkeit und Verkürzungsfähigkeit bei Entziehung grösserer Wassermengen abnimmt, bis sie schliesslich ganz erlischt. Hierbei wurde von den schwankenden Erregbarkeitsänderungen bei relativ geringer Wasserentziehung ganz abgesehen. Da nun aber durch Wasserentziehung unerregbar gewordene Muskeln durch Wasserzufuhr unter Umständen ihre Erregbarkeit wiedergewinnen, also lebensfähig bleiben, so wurde ferner untersucht, bei welchem Wasserverlust der Muskel seine Erregbarkeit nur reversibel und bei welchem er sie auch irreversibel inbüsst. Ausgeführt wurden die Untersuchungen auf Anregung von Herrn Prof. Dr. Paul Jensen, dem ich für seine ausgiebige Unterstützung bei dieser Arbeit zu allergrösstem Dank verpflichtet bin. Auch möchte ich Herrn Geh. Rat Tammann für einige freundliche Ratschläge bestens danken.

B. Bemerkungen zur Literatur.

Verminderungen des Wassergehaltes von Muskeln sind in sehr verschiedener Weise zu verschiedenen Zwecken bewirkt worden. Die einfachste Methode dürfte die Austrocknung des isolierten Muskels an freier Luft sein. Sodann kommt das Durstenlassen des ganzen Tieres in Betracht; auf diese Weise kann man zum Beispiel bei Fröschen durch mehrtägigen Aufenthalt in einem trocknen Raum sehr erhebliche Wasserverluste erzielen, ein Verfahren, das Durig[1]) besonders angewandt hat. Ferner lässt sich der isolierte Muskel oder das ganze Tier durch Einwirkung hypertonischer Lösungen oder sonstiger wasserentziehender Mittel austrocknen; solche Mittel kann man auch durch Injektion in den Körper des Versuchstieres, zum Beispiel durch Einbringen in die Lymphsäcke des Frosches, zur Wirkung kommen lassen. Endlich findet auch beim Gefrieren eines Gewebes eine besondere Art der Wasserentziehung statt[2]).

Die Erfahrungen über die Abhängigkeit der Lebensprozesse vom Wassergehalt, die auf diesen verschiedenen Wegen gesammelt wurden, betreffen vorwiegend nur geringere Grade der Austrocknung Da wir uns mit diesen hier nicht weiter befassen werden, begnügen wir uns mit einem Hinweis auf die Untersuchungen von

1) l. c. S. 403 ff.

2) Siehe hierüber unten S. 22.

J. Ranke[1]), H. Buchner[2]), Hermann[3]), Kühne[4]), Biedermann[5]), A. Durig[6]) und F. Urano[7]). Letzterer prüfte das Verhalten von Muskeln und Nerven, die 1—2 Stunden in hypo- bzw. hypertonischer Ringer-Lösung versenkt waren. Schon aus den Versuchen Overton's[8]) ging hervor, dass die Wasserbewegung zwischen Sartorius und Salzlösungen in ½—1½ Stunden fast vollkommen abgelaufen ist. Mitteilungen über die Folgen höherer Grade der Austrocknung finden wir beiläufig bei Durig: Danach kann ein Frosch, ohne zugrunde zu gehen, 39 % seines Wassers abgeben[9]); hieraus ist jedoch nicht zu ersehen, in welchem Maasse sich an diesem Wasserverlust die Muskeln des Tieres beteiligen. So hohe Grade der Austrocknung sind bei den anderen hierher gehörigen Versuchen wohl kaum wieder erreicht worden; durch hypertonische Lösungen lässt sich dem isolierten Muskel überhaupt nur verhältnismässig wenig Wasser entziehen[10]), und bei den Versuchen, wo er durch Verdunsten an der Luft ausgetrocknet wurde, waren grössere quantitativ zu bestimmende Wasserentziehungen bisher nicht beabsichtigt.

C. Die Art der Koexistenz von Wasser, Kolloiden und Kristalloiden im Muskel.

Um uns von der Wasserbewegung und ihren Begleiterscheinungen bei den verschiedenen Arten der Austrocknung ein Bild machen zu können, müssen wir zunächst einen Blick auf die Art und Weise werfen, wie Wasser, Kolloide und Kristalloide im Muskel miteinander kombiniert sind.

---

1) J. Ranke, Die Lebensbedingungen der Nerven S. 53—54. Leipzig 1868.

2) H. Buchner, Zeitschr. f. Biol. Bd. 12 S. 135. 1874.

3) Hermann, Handb. d. Physiol. Bd. 2 (1) S. 98. Leipzig 1879.

4) Kühne, Zeitschr. f. Biol. Bd. 22 S. 305. 1886; Bd. 24 S. 383. 1888; Bd. 26 S. 203. 1890.

5) Biedermann, Elektrophysiologie S. 365, 422. Jena 1895.

6) A. Durig, Wassergehalt und Organfunktion. Pflüger's Arch. Bd. 85 S. 401. 1901; Bd. 87 S. 42. 1901; Bd. 92 S. 222. 1902.

7) F. Urano, Die Erregbarkeit von Muskeln und Nerven unter dem Einfluss verschiedenen Wassergehalts. Zeitschr. f. Biol. Bd. 32 S. 459. 1908.

8) Overton, Beiträge zur allgemeinen Muskel- und Nervenphysiologie. Pflüger's Arch. Bd. 92 S. 143. 1902.

9) A. Durig, l. c. S. 43.

10) Overton, l. c. S. 150 ff.

Der Froschmuskel enthält nach übereinstimmenden Analysen von Ranke, Katz und Overton rund 80 % Wasser. Overton[1]) R. du Bois-Reymond[2]) und in neuester Zeit P. Jensen und H. W. Fischer[3]) haben sich eingehend mit der Frage beschäftigt, in welchem Zustand das Wasser im Muskel enthalten ist. An die betreffenden Versuche und Anschauungen, die Jensen und Fischer einer eingehenderen Besprechung unterzogen haben, knüpfe ich hier kurz an.

Das gesamte Wasser des Muskels zerfällt in zwei physiologisch streng zu scheidende Teile: der eine Teil befindet sich in den Muskelfasern („Faserwasser"), der andere Teil im Bindegewebe („Zwischenflüssigkeit", das heisst Lymphe).

Man kann sich nun denken, dass das Wasser in der lebendigen Substanz der Muskelfasern („Faserwasser") einesteils als „freies" oder als „wässerige" Phase, andernteils als an die Kolloide „gebundenes" vorkommt. Dieser von Overton[4]) und du Bois-Reymond vertretenen Anschauung schliesst sich auch Jensen[5]) an: Hiernach ist ein Teil des Wassers des Muskels als „einfache wässerige Lösung" vorhanden und das übrige in einer anderen Phase (Kolloidphase) gelöst, die Overton als „amorph-fest" bezeichnet. Letzterer spricht demnach von einer „festen Lösung" des Wassers in der letzteren Phase oder kurz von „Quellungswasser". Und dieses Quellungswasser sei so fest gebunden, dass einem Muskel beispielsweise die Hälfte dieses Wassers nur entzogen werden könnte durch die Einwirkung einer Salzlösung von einem osmotischen Druck im Betrage von mehreren hundert Atmosphären.

Nach Overton ist das Faserwasser von einer semipermeablen Membran umschlossen, nämlich der äusseren unmittelbar unter dem Sarkolemm liegenden Grenzschicht des Protoplasmas, und ist des-

---

1) Overton, Beiträge zur allgemeinen Muskel- und Nervenphysiologie. Pflüger's Arch. Bd. 92 S. 137. 1902.

2) R. du Bois-Reymond, Quellungsvorgang und Gewebsflüssigkeiten. Sitzungsber. d. Gesellsch. Naturf.-Freunde 1903 S. 361.

3) P. Jensen und H. W. Fischer, Der Zustand des Wassers in der überlebenden und abgetöteten Muskelsubstanz. Verworn's Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. 11 S. 23. 1910.

4) l. c. S. 115.

5) l. c. S. 26.

halb in seiner Menge vom osmotischen Druck der Umgebung abhängig. Anders verhält sich die Zwischenflüssigkeit. „In die letztere und aus ihr können im allgemeinen Salze und Wasser beliebig hinein- bzw. hinausdiffundieren, so dass sie in einiger Zeit stets die Zusammensetzung des Mediums annimmt, in welches der Muskel versenkt ist."

Über die Mengenverhältnisse zwischen dem „Faserwasser" und der „Zwischenflüssigkeit" geben uns die Versuche Overton's und Urano's[1]) Aufklärung. Hiernach „macht die Zwischenflüssigkeit etwa ein Fünftel des gesamten Muskelvolums aus. Und da wir annehmen dürfen, dass Wasser und Fixa der Muskelfasern und der Zwischensubstanz (Perimysium, Sarkolemm, Blutgefässe, Nerven) ungefähr im gleichen gewichtsprozentischen Verhältnis zueinander stehen, so ist zu folgern, dass man von den 80% Gesamtwasser des Muskels ein Fünftel abziehen muss, um die Menge des Faserwassers zu erhalten."

Das Mengenverhältnis zwischen freiem und gebundenem Faserwasser haben Jensen und Fischer zu ermitteln versucht. Sie berechnen, dass nach den Versuchen Overton's 68% des Faserwassers „frei" und 32% „gebunden" sein müssten[2]). Demgegenüber kommen sie auf Grund ganz andersartiger eigener Versuche zu dem Ergebnis, dass der frische überlebende Muskel nur ca. 5% gebundenes Faserwasser enthält; doch steige dieses gebundene Wasser bei einem auf 100° C. erhitzten Muskel auf etwa 28% und nehme bei Muskeln, die auf 115° C. gebracht wurden, noch erheblich zu. Danach denken Jensen und Fischer an die Möglichkeit, dass die verschiedenen Ergebnisse hinsichtlich der Menge des gebundenen Wassers durch verschiedene Zustände der Muskelkolloide in ihren und Overton's Versuchen bedingt seien; in den Versuchen Overton's, bei denen es sich um Wirkungen hypertonischer NaCl-Lösungen handelt, könnte nämlich durch diese letzteren eine Änderung der Kolloide des Muskels bewirkt werden, die zu einer abnormen Erhöhung ihrer Quellungsfähigkeit führt.

---

1) F. Urano, Nachtrag zu „Neue Versuche über die Salze des Muskels". Zeitschr. f. Biol. Bd. 51 S. 490. 1908.

2) l. c. S. 29.

D. Gedankengang für die folgenden Untersuchungen.

Für unseren Zweck kam es darauf an, eine Methode der Wasserentziehung zu wählen, die mit möglichst wenig schädigenden Nebenwirkungen verbunden war: In dieser Hinsicht zeigen die verschiedenen oben genannten Austrocknungsverfahren erhebliche Unterschiede. Wir wollen daraufhin nur die Wasserabgabe des isolierten Muskels an der Luft, die des ganzen Frosches an der Luft und die des isolierten Muskels in hypertonischen Lösungen betrachten.

Am meisten schädigende Nebenwirkungen setzt unfraglich die letztgenannte Methode, wie zunächst an dem Beispiel einer hypertonischen NaCl-Lösung dargelegt sei. In diesem Falle werden Wasser und alle exosmierbaren Salze ausser Kochsalz den Muskel verlassen und das letzte in ihn eintreten bis zum osmotischen Gleichgewicht. Dieser Vorgang ist aber dadurch kompliziert, dass normalerweise nur die Zwischenflüssigkeit (Lymphe) an dem Ausgleich der osmotischen Partialdruckdifferenzen der gelösten Stoffe unbehindert teilnimmt, während der Muskelfaserinhalt durch seine semipermeable Plasmahaut in dieser Hinsicht beschränkt ist[1]); dass diese Beschränkung aber bei der Schädigung des Protoplasmas durch die Wasserentziehung zunehmend vermindert wird, wodurch nun mit dem Austreten der Salze neue Schädigungen gesetzt werden. Diese Schädigungen haben dann im allgemeinen eine Erhöhung der Quellbarkeit der Muskelkolloide zur Folge, die ausserdem auch durch die Abnahme der Kristalloide beeinflusst werden dürfte[2]). Wir sehen also, dass die Wasserentziehung durch eine hypertonische Lösung mit mannigfachen Nebenwirkungen verbunden ist.

Nicht weniger kompliziert ist die Wasserentziehung durch hypertonische Lösungen von Salzgemischen nach Art der Ringerschen, Göthlin'schen usw. Flüssigkeiten. Hier findet zunächst mit dem Wasseraustritt aus dem Muskel ein Eindringen von Salzen in die Zwischenflüssigkeit und dann, nach Beginn der Schädigung des Protoplasmas durch den Wasserverlust, eine Endosmose von Salzen auch in das letztere statt, mit den erwähnten Wirkungen auf die Quellbarkeit seiner Kolloide.

---

1) Siehe hierüber R. Höber, Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe, 4. Aufl., S. 388. Leipzig und Berlin 1914.

2) Über einige weitere Komplikationen, siehe Höber, l. c. S. 80 u. 332.

Vielleicht am schonendsten ist die Austrocknung des Muskels durch Austrocknen des ganzen Frosches an freier Luft. Hierbei findet nämlich neben der Wasserabgabe auch eine vermehrte Ausscheidung von löslichen Stoffen durch Niere, Darm usw. statt, wodurch die Zunahme der molekularen Konzentration des Muskelwassers, die infolge des Wasserverlustes zu erwarten wäre, gehemmt werden dürfte. In welchem Maasse dies geschieht, ist freilich unbestimmt, auch muss mit der Möglichkeit gerechnet werden, dass der Muskel mit schädigenden Stoffwechselprodukten anderer Organe angereichert wird. Endlich wird der Wasserentziehung des Muskels auf diesem Wege durch den Austrocknungstod des Zentralnervensystems wohl ein vorzeitiges Ziel gesetzt.

Was endlich die Austrocknung des isolierten Muskels an der Luft betrifft, so wird diese vermutlich zu einer Zunahme der molekularen Konzentration des Muskelwassers führen. Ob der letzteren vielleicht durch eine vermehrte Bindung der Salze durch die Kolloide entgegengewirkt wird, wissen wir nicht.

Von dieser letzteren Art der Wasserentziehung haben wir hier Gebrauch gemacht und ihre Verwendbarkeit nach verschiedenen Richtungen hin untersucht. Hierbei lag die Hauptschwierigkeit darin, dass der Muskel nicht zugleich schnell und doch gleichmässig durch seine ganze Masse hindurch ausgetrocknet werden kann. Letzteres ist eben deshalb nötig, weil sonst die Austrocknung und die Schädigung der äusseren und inneren Teile des Muskels erheblich verschieden sein konnten, ohne dass sich die zusammengehörigen Änderungen dieser beiden Anteile der Muskelmasse quantitativ bestimmen liessen. Die genügend schnelle Austrocknung andererseits ist deshalb erforderlich, weil sonst die „Zeitschädigung“ des Muskels zu gross wird. Da nun die Geschwindigkeit der Wasserabgabe des Muskels einerseits von dem Dampfdruck des umgebenden Luftraumes, andererseits von der Temperatur abhängt, so kam es darauf an, geeignete Kombinationen dieser beider Bedingungen zu wählen. Damit ergaben sich im wesentlichen drei verschiedene Versuchsreihen:

1. wurde der Muskel, hauptsächlich zur allgemeinen Orientierung, an freier Luft bei verhältnismässig niedrigen Temperaturen, nämlich zwischen 3° und 11° C., ausgetrocknet;
2. wurde die Wasserentziehung in einem abgeschlossenen Luftraum vorgenommen, bei verschiedenen konstanten Dampf-

drucken und bei Temperaturen zwischen 15° und 22° C. Die Dampfdrucke wurden so gewählt, dass sie zwischen dem des destillierten Wassers und dem einer 30 %igen NaCl-Lösung lagen;

3. fand die Wasserentziehung des vorher gefrorenen Muskels in einem abgeschlossnen trockenen Luftraum statt, teils mit, teils ohne hygroskopische Substanz, bei konstanten Temperaturen von — 0,8° bis — 1,2° C.

E. Experimenteller Teil.

I. Allgemeine Methodik.

Zu allen Versuchen, die in verschiedenen Jahreszeiten ausgeführt wurden, diente der M. sartorius von R. arvalis oder R. fusca. Die Frösche, die seit Monaten in einem Keller von sehr konstanter Jahrestemperatur aufbewahrt wurden, zeigten durchschnittlich dieselbe Temperatur. Es wurden stets beide Sartorien aus dem getöteten Tier vorsichtig herauspräpariert und an der distalen Sehne eine dünne Seidenschlinge befestigt, an welcher der Muskel aufgehängt werden konnte. Die proximale Sehne wurde immer dicht am Knochen durchtrennt und wurde, wenn der Muskel zur Aufzeichnung seiner Verkürzungsgrösse mit einem Schreibhebel verbunden werden sollte, von einer besonders konstruierten Klemme gefasst. Diese hatte ein ähnliches Aussehen wie die kleinen physiologischen Arterienklemmen mit dem Unterschiede, dass der Schnabel so breit gehalten war, dass mit ihm die ganze Breite der Muskelsehne gefasst werden konnte. Dadurch blieben die Muskelfasern parallel in ihrer Lage, was auch einer gleichmässigen Austrocknung dienlich war. Zu Beginn jedes Versuches wurde zunächst das Gewicht des Muskels, seine Reizschwelle und auch seine Hubhöhe[1]) bei maximaler Reizung bestimmt. Es sei besonders betont, dass erst gewogen und dann gereizt wurde. Der hierbei stattfindende Wasserverlust konnte als minimaler Teil des Gesamtgewichts vernachlässigt werden, wie mehrere nach der Reizung ausgeführte Wägungen zeigten. Die Gewichtsbestimmung geschah schnell mittels einer kurzarmigen chemischen Wage, wo der

1) Unter „Hubhöhe" verstehen wir hier und im folgenden die Zuckungshöhe des Muskels bei sechsfacher Hebelvergrösserung.

Muskel an einem oberhalb der Schale befindlichen Häkchen aufgehängt wurde. Gereizt wurde mit einzelnen Induktionsschlägen, und zwar immer direkt; hierbei wurden entweder die aus zwei Platindrähten bestehenden Elektroden dem mit dem Schreibhebel verbundenen Muskel an der Innenseite angelegt, oder es wurde oben um die Klemme und unten um den Muskel je ein sehr dünner Kupferdraht geschlungen, der mit der sekundären Spirale eines du Bois-Reymond'schen Schlitteninduktoriums verbunden war. Es sei daran erinnert, dass es für die Bestimmung der Reizschwelle durchaus nicht gleichgültig ist, an welchen Stellen die Elektroden angelegt werden; wie Hofmann und Blaas[1]) nachgewiesen haben, findet die Nervenausbreitung in den unteren zwei Dritteln des Froschsartorius statt, während das obere Drittel vollkommen frei von Nervenfasern ist. Dementsprechend zeigten sich auch die Mukeln im Nervenbereich und besonders an der Nerveneintrittsstelle am erregbarsten. Je mehr man die Elektroden von dieser letzteren nach oben hin entfernt, desto geringer wird die Erregbarkeit. Deshalb fand in allen Versuchen, wo mittels der Platinelektroden gereizt wurde, die Anlegung derselben immer an der Nerveneintrittsstelle statt. Hierbei liess sich feststellen, dass der wasserarme Muskel seine maximale Erregbarkeit genau an derselben Stelle besitzt wie der frische Muskel. Da, wo die Hubhöhe des Muskels bei maximaler Zuckung ermittelt wurde, geschah dies durch Aufzeichnung auf stillstehender Trommel, bei sechsfacher Hebelvergrösserung und einer Belastung von 4,7 g an der Achse.

II. Erste Versuchsreihe: Austrocknung an freier Luft bei Temperaturen zwischen 3° und 11° C.

In dieser Versuchsreihe wurde der Muskel so lange an der freien Luft aufgehängt, bis er seine Erregbarkeit verloren hatte, und dann der Wasserverlust durch Wägen bestimmt. Die Versuche wurden sämtlich im Winter ausgeführt in einem Raume, dessen Temperatur zwischen 3° und 11° C. lag. Nachdem der frisch präparierte Muskel gewogen, seine Reizschwelle und in einzelnen Fällen seine Hubhöhe festgestellt waren, blieb er aufgehängt und mit dem Schreibhebel verbunden,

1) F. B. Hofmann und E. Blaas, Untersuchungen über die mechanische Reizbarkeit der quergestreiften Skelettmuskeln. Arch. f. d. ges. Physiol. Bd. 125 S. 137. 1908.

bis er unerregbar geworden war. Die Reizung geschah in den meisten Fällen mittels der Platinelektroden, die in Intervallen von 2—15 Minuten dem Muskel, soweit nichts anderes bemerkt, immer genau an derselben Stelle angelegt wurden. Ermöglicht wurde dies durch die Befestigung der Elektroden an einem gelenkigen Arm eines Statifs, der eine Hin- und Herbewegung der Elektroden in derselben horizontalen Ebene gestattete. Es seien zur Probe einige Versuche mit ihren wesentlichen Einzelheiten mitgeteilt:

Versuch 1[1]. 3. Dezember 1915. Zimmertemperatur 9° C. R. fusca, getötet 10 h 35′. Gewicht des Sartorius 0,0882 g.

Zeit	Reizschwelle[2]	Zeit	Reizschwelle
10 h 50′	170	11 h 02′	95
10 h 53′	130	11 h 04′	80
10 h 55′	120	11 h 06′	keine Zuckung
11 h 00′	110		

Gewicht des Muskels um 11 h 10′ = 0,0774 g. Gewichtsverlust ca. 11 %, entsprechend einem Wasserverlust[3] von 15,3 %.

Der Muskel verlor demnach in 16 Minuten bei einem Wasserverlust von nur ca. 15 % seine Erregbarkeit.

Versuch 2. 3. Dezember 1915. Der andere Sartorius desselben Frosches wurde 11 h 25′ präpariert. Das Gewicht betrug wie beim ersten Sartorius 0,0882 g.

Zeit	Reizschwelle	Zeit	Reizschwelle
11 h 30′	195	12 h 40′	108
11 h 36′	145	12 h 53′	105
11 h 40′	145	1 h 12′	95
11 h 49′	137	1 h 20′	85
11 h 55′	134	1 h 30′	80
12 h 08′	132	1 h 32′	60
12 h 30′	110	1 h 33′	keine Zuckung

Gewicht 1 h 35′ = 0,0506 g; Gewichtsverlust 42,6 % = Wasserverlust von 53,3 %.

Im Vergleich mit dem vorigen Versuch ist auffallend, dass diesmal der Muskel ca. 53 % seines Wassers abgeben konnte, ehe er völlig unerregbar wurde.

---

1) Hier und im folgenden sind von den sämtlichen ausgeführten Versuchen nur einzelne ausgewählt und fortlaufend numeriert.

2) Die Reizschwelle ist stets für Öffnungsinduktionsströme in Millimeter Rollenabstand der sekundären Spirale angegeben.

3) Bei der Berechnung des prozentischen Wasserverlustes wurde der normale Wassergehalt immer zu 80 % des Muskelgewichts angenommen (s. oben S. 7).

Versuch 3. 6. Dezember 1915. R. arvalis. Getötet 11 h 05′. Temperatur 9 ° C.

Länge des Sartorius 2,8 cm. Hubhöhe 2,7 cm. Gewicht um 11 h 15′ = 0,063 g.

Zeit	Reizschwelle	Zeit	Reizschwelle
11 h 20′	195	11 h 57′	120
11 h 27′	125	12 h 10′	90
11 h 35′	125	12 h 35′	60
11 h 45′	120		

Bei einem Rollenabstand von 60 mm um 12 h 35′ noch kaum merkbare Zuckungen. Gewicht 0,053 g. Gewichtsverlust 16 %.

Versuch 4. 7. Dezember 1915. Temperatur 11 ° C. Frosch seit 24 Stunden in geheiztem Zimmer. Gewicht des M. sartorius 0,0529 g.

Zeit	Reizschwelle	Zeit	Reizschwelle
11 h 18′	185	11 h 26′	50
11 h 23′	95	11 h 28′	keine Zuckungen

Gewicht 11 h 30′ = 0,0486 g. Gewichtsverlust ca. 8 % = 10,2 % Wasserverlust.

Versuch 5. 13. Dezember 1915. Temperatur 8 ° C. R. fusca. Getötet 11 h 16′. Gewicht des Sartorius um 11 h 25′ = 0,0646 g.

Zeit	Reizschwelle	Zeit	Reizschwelle
11 h 30′	195	12 h 06′	35
11 h 39′	120	12 h 09′	keine Zuckungen.
11 h 47′	100		Jetzt Elektroden
11 h 51′	90		am Nerveneintritt
11 h 55′	85	12 h 39′	keine Zuckungen
12 h 02′	65		mehr

Gewicht 0,0452 g. Gewichtsverlust 31,4 %.

Versuch 6. 8. März 1916. Temperatur 3 ° C. R. arvalis. Gewicht des M. sartorius 11 h 20′ = 0,08 g. Reizschwelle 150. 1 h 05′ keine Zuckungen mehr. Gewicht 0,0638 g. Gewichtsverlust 20,2 %.

Versuch 7. 17. Dezember 1915. R. fusca. Gewicht des M. sartorius 0,0594 g.

Zeit	Reizschwelle	Zeit	Reizschwelle
11 h 44′	225	12 h 09′	90
	Elektroden Mitte Muskel	12 h 12′	90—70
11 h 51′	110	12 h 14′	70
11 h 54′	95		Elektroden oben
11 h 57′	85	12 h 20′	70
12 h 01′	70	12 h 21′	95
12 h 06′	90		Elektroden am Nerven-
	Elektroden am Nerven-		eintritt
	eintritt	12 h 24′	keine Zuckungen

Gewicht 0,0442 g. Gewichtsverlust 25,6 %

Die mitgeteilten und andere ähnliche Versuche zeigen, dass

1. der Sartorius bei sehr verschiedenem durchschnittlichem[1]) Wasserverlust seine Erregbarkeit einbüsst; der geringste beobachtete Wert findet sich schon bei etwa 10 % (Versuch 4), der höchste bei etwa 53 % des gesamten Wassers. Auf die Frage, worauf diese Unterschiede beruhen, wurde nicht weiter eingegangen.

Als auffallend sei hervorgehoben, dass die beiden Sartorien desselben Tieres, die nacheinander mit einem Zeitintervall von nur 40 Minuten zum Versuch genommen wurden, bei ziemlich gleicher anfänglicher Erregbarkeit hinsichtlich ihres zur Unerregbarkeit führenden Wasserverlustes um das mehr als 3,5 fache differierten.

2. Über den zeitlichen Verlauf der Austrocknung lässt sich aus unseren Versuchen nichts Näheres entnehmen, da die Grösse des Muskels und die Temperatur in den einzelnen Versuchen verschieden waren; immerhin sei daran erinnert, dass in Versuch 4 etwa 10 % Wasser in 12 Minuten abgegeben wurden, ferner in Versuch 3 ca. 20 % in 75 Minuten und in Versuch 2 etwa 50 % in 120 Minuten.

3. waren die Ergebnisse, wie nicht anders zu erwarten war, insofern unbestimmt, als sie keinen Aufschluss über die verschiedenen partiellen Wasserverluste der inneren und äusseren Muskelteile zu geben vermochten. Dass hier erhebliche Unterschiede auftraten, lehrte auch der Augenschein. Die bräunlich-gelbe Verfärbung, die den ausgetrockneten Muskel gegenüber dem helleren frischen auszeichnet, ist nämlich an den dünneren Randteilen ausgeprägter als in den mittleren Partien. Auch sind diese letzteren noch weich und biegsam zu einer Zeit, wo die ersteren schon anfangen, durch die Austrocknung hart und spröde zu werden. Da man annehmen darf, dass ganz allgemein die Oberfläche des in dieser Weise ausgetrockneten Muskels mehr Wasser verloren hat als die Innenteile, so wird sie nicht nur ihre Erregbarkeit früher einbüssen als diese, sondern vielleicht auch ihren elektrischen Leitungswiderstand so weit erhöhen, dass sie die Zuführung des elektrischen Reizes zu den etwa noch erregbaren inneren Teilen nicht mehr zulässt. Dadurch werden diese Versuche mehrdeutig.

---

1) „Durchschnittlich“ insofern, als hier das Mittel aus dem Wasserverlust der äusseren und inneren Teile des Muskels vorliegt; siehe oben S. 10 und etwas weiter unten.

Nach diesen Vorversuchen wurde jetzt zunächst nachgesehen, ob und inwieweit sich etwa die genannten Schwierigkeiten bei dem in der folgenden Versuchsreihe angewandten Verfahren abmildern liessen.

III. Zweite Versuchsreihe: Wasserentziehung in einem abgeschlossenem Luftraum bei verschiedenen konstanten Dampfdrucken und bei Temperaturen zwischen 15° und 22° C.

a) Zur Methodik.

Das Verfahren dieser Versuchsreihe gründet sich auf folgende Überlegung: Hängt man einen Muskel in einen abgeschlossenen Luftraum über eine wässerige Lösung von niedrigerer Dampfspannung als der des Muskels, so wird diesem so lange Wasser entzogen werden, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Schwankungen der Aussentemperatur, die zu Temperaturdifferenzen zwischen Muskel und Gefäss führen, müssen dabei möglichst vermieden werden, da sich sonst, je nachdem ob die Temperatur steigt oder fällt, Niederschläge von reinem Wasser entweder am Muskel oder an der Gefässwand bilden müssen. Solange aber solche Niederschläge zum Beispiel an der Glaswand vorhanden sind, wird der Dampfdruck des Raumes in variabler Weise erhöht, indem er Werte annimmt, die aus den Spannungen der betreffenden Lösungen und des reinen Wassers resultieren. Auf Grund dieser Überlegungen untersuchten wir die Wasserabgabe des Muskels in Räumen von verschiedenem Dampfdruck und sahen nach, ob sich auf diese Weise vielleicht eine gleichmässigere Austrocknung erzielen liesse. Die derzeitige, meistens etwas höhere Aussentemperatur gestattete auch bei entsprechend geringeren Dampfspannungsdifferenzen zwischen Muskel und Lösung die erforderliche schnelle Wasserbewegung vom Muskel zur Lösung.

Die Versuche wurden in folgender Weise ausgeführt: Eine Anzahl Flaschen (je 500 ccm Inhalt) mit gut schliessenden Glasstöpseln wurden in einer Kochkiste an einem schattigen Raum bei möglichst konstanter Temperatur aufgestellt. Der Muskel hing frei über der den Dampfdruck bestimmenden Lösung — etwa 100 ccm — an einem Häkchen, welches mittels Siegellack an der unteren Fläche des Glasstöpsels befestigt war. Das Einfachste wäre gewesen, H_2SO_4-Lösungen verschiedener Konzentration zu verwenden, da der Dampfdruck einer grossen Anzahl verschiedener Konzentrationen in Tabellen zu finden ist. Da aber Schwefelsäure sich zersetzt (auch im Dunkeln) und daran

zu denken war, dass die dabei freiwerdenden SO_3-Dämpfe den Muskel schädigen könnten, so wurden geeignete NaCl-Lösungen hergestellt, und zwar solche von 30 %; 15 %; 7,5 %; 3,75 %; 1,87 %; 0,93 %; 0,7 %; 0,6 %; 0,3 %; 0,2 %; 0,1 %.

Dieses Verfahren ist auch insofern naheliegend, als uns ja in der Physiologie als praktische Maasse für osmotischen Druck, Gefrierpunkt usw. häufig NaCl-Lösungen von bestimmtem Prozentgehalt dienen.

Es ist einleuchtend, dass dieses Verfahren, das mit der Grösse des Dampfdruckes des Muskels rechnet, bei genügender Genauigkeit auch zur Bestimmung eben dieses Dampfdruckes dienen kann; der Dampfdruck derjenigen Flasche nämlich, in welcher der Muskel keine Änderung seines Wassergehaltes zeigte, musste auch der des Muskels sein. Da die Kenntnis der Dampfspannung des Muskels für das Verständnis seiner Wasserbewegung von Interesse war, so haben wir auch auf diese Frage beiläufig unsere Aufmerksamkeit gerichtet.

Durch das genannte Verfahren wird also zunächst festgestellt, wievielprozentig die NaCl-Lösung ist, die denselben Dampfdruck hat wie der Muskel. Will man aber auch die Grösse des Dampfdruckes in mm Hg kennen, was vor allem für die Erkenntnis der Bedeutung einer möglichst genauen Konstanz der Versuchstemperatur wichtig ist[1]), so kann man sich diese Grössen für die gewünschten Temperaturen berechnen.

Hierzu geht man von bekannten Dampfdruckwerten aus, die bestimmte NaCl-Lösungen bei 0° haben. Aus diesen ermittelt man zunächst durch graphische Interpolation die für 0° geltenden Dampfdrucke der Kochsalzlösungen, die man benutzen will. Um nun auch noch die den verschiedenen Temperaturen entsprechenden Tensionen dieser verschiedenen Lösungen zu erhalten, benutzt man die Gleichung:

$$p'_t = p_t - p_t\, K \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1.$$

Hierin ist:

p'_t = der gesuchte Dampfdruck einer bestimmten NaCl-Lösung bei der Temperatur t° C.

p_t = der bekannte Dampfdruck des reinen Wassers bei t° C.

K = eine von der Konzentration der NaCl-Lösung abhängige Konstante.

1) Eine Temperaturänderung von 0,1° C. bedingt bei der gleichen Lösung schon eine Tensionsänderung von etwa 0,05 mm Hg, während bei konstanter Temperatur (etwa bei 10° C.) zum Beispiel der Dampfdruck einer 0,7 %igen NaCl-Lösung von dem des reinen Wassers nur um 0,024 mm Hg verschieden ist.

Für die Lösung der Gleichung 1 müssen wir die Konstante K kennen; diese ergibt sich aus der Gleichung:

$$K = \frac{p_o - p'_o}{p_o} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2.$$

worin p_o = der bekannte Dampfdruck des reinen Wassers bei 0° C. und p'_o = der bekannte Dampfdruck der betreffenden NaCl-Lösung bei 0° C.

Auf diese Weise wurden die Dampfdrucke einiger der oben genannten NaCl-Lösungen für 5° C., 10° C., und 16,5° C. berechnet (s. Tab. 1).

Tabelle 1.

	Konzentration der NaCl-Lösungen in Prozenten						
	30	15	0,7	0,3	0,2	0,1	Aq. dest.
K = konst.	0,202	0,0909	0,0026	0,0017	0,0015	0,001	—
Tension der Lösung:							
bei 0° C. . . .	3,685	4,2	4,608	4,612	4,613	4,615	4,62
„ 5° C. . . .	5,21	5,934	6,511	6,517	6,518	6,521	6,528
„ 10° C. . . .	7,325	8,345	9,155	9,163	9,165	9,17	9,179
„ 16,5° C. . . .	11,173	12,729	13,965	13,977	13,98	14,0	14,001

Diese Tabelle zeigt die schon erwähnte wichtige Tatsache, dass der Dampfdruck zum Beispiel einer 0,7 %igen Lösung von einer 0,1 %igen bei gleicher Temperatur nur sehr wenig verschieden ist, dass aber schon geringe Temperaturdifferenzen bei gleicher Konzentration der Lösung beträchtliche Unterschiede ihrer Dampfspannungen bedingen.

b) Versuche und Ergebnisse.

Die Versuche wurden in der Weise ausgeführt, dass die frisch präparierten Muskeln, nachdem ihr Gewicht, ihre Erregbarkeit usw. bestimmt worden waren, in den Flaschen mit den verschiedenen Lösungen aufgehängt wurden, wo sie etwa 5 Stunden bis mehrere Tage verblieben. Hierbei wurde aus den eben dargelegten Gründen besonders auf Temperaturkonstanz geachtet.

Einige Versuche und ihre Ergebnisse sind im folgenden wiedergegeben:

Versuch 8. R. arvalis. Zimmertemperatur 16,7° C.

	NaCl-Lösung von			
	30 %	15 %	0,7 %	0,3 %
Gewicht 13. Mai 1915 12h 30′ in g	0,1104	0,1248	0,111	0,1248
Gewicht 13 Mai 1915 4h 45′ in g	0,0734	0,1082	0,1022	0,1222
Gewichtsverlust	33,5 %	13,2 %	8,1 %	2 %
Wasserverlust	41,9 %	—	—	—
Gewicht 17. Mai 1915 12h 30′ .	0,0288	0,035	0,0762	0,075
Gewichtsverlust	ca. 74 %	ca. 73 %	31,3 %	48 %

Nach der anfänglichen 4¼ stündigen Austrocknung über der 30 %igen resp. 15 %igen NaCl-Lösung verhielten sich die Muskeln nicht anders als diejenigen, die an freier Luft einen Wasserverlust von ca. 40 % resp. ca. 13 % erfahren hatten. Die Muskeln über der 0,7 %igen und 0,3 %igen Lösung waren dem Aussehen nach von frischen Muskeln nur sehr wenig verschieden. Nach 4 Tagen ferner waren sämtliche Muskeln sehr verkürzt und totenstarr.

Versuch 9. R. arvalis. Zimmertemperatur 16,5 ° C.

Zeit	30 %	1,88 %	0,7 %	0,2 %
10 h 20′	0,1372	0,0692	0,131	0,0734
5 h 20′	0,0774	0,059	0,113	0,0624
Gewichtsverlust. . . .	43 %	15 %	14,7 %	13,7 %

Versuch 10. R. arvalis. Zimmertemperatur 20,5 ° C.

Zeit	0,7 %	0,6 %	0,5 %	0,4 %	Aq. dest.
Zu Beginn des Versuchs	0,0786	0,0832	0,0856	0,0844	0,0832
Nach 48 Stunden . .	0,07	0,082	0,085	0,092	0,09
Gewichtsdifferenz. . .	− 11 %	− 1,4 %	− 0,7 %	+ 8,2 %	+ 7,5 %

Sämtliche Muskeln erheblich verkürzt und totenstarr.

Versuch 11. R. fusca. Zimmertemperatur 8,4 ° C.

Zeit	0,7 %	0,5 %	0,3 %	Aq. dest.
1 h 15′	0,131	0,13	0,141	0,149
6 h 30′	0,129	0,1288	0,1384	0,149
Gewichtsverlust. . . .	1,3 %	1,0 %	1,8 %	Gleichgew.

Versuch 12. R. arvalis. Zimmertemperatur 18,5 ° C.

Zeit	0,8 %	0,7 %	0,5 %	0,4 %
2. Juni 3 h 25′ . . .	0,094	0,0794	0,0766	0,076
3. Juni 11 h 45′ . . .	0,0882	0,077	0,074	0,075
Gewichtsverlust . . .	0,0058	0,0024	0,0026	0,001
6 h 30′ . . .	0,0888	0,0742	0,071	0,071
4. Juni 12 h 35′ . . .	0,0852	0,0722	0,069	—
5. Juni 3 h 45′ . . .	0,0852	0,07	0,0686	0,072
Gewichtsverlust. . . .	10,4 %	8,4 %	10,4 %	5,2 %

Aus den mitgeteilten Versuchen ist zunächst betreffs der Frage, wieviel Wasser der Muskel bis zur Erreichung seiner Unerregbarkeit abgeben kann, zu ersehen, dass dieses Verfahren nicht weiter führte als das der ersten Versuchsreihe. Auch bei verhältnismässig hohen Temperaturen fand eine lebhafte Wasserabgabe erst über der 30%-igen NaCl-Lösung statt, wobei sich kein Vorteil gegenüber dem früheren Verfahren herausstellte. Über Lösungen von höherer Dampfspannung war die Wasserabgabe schon so langsam, dass grössere Wasserverluste nicht ohne störende „Zeitschädigung" des Muskels zu erzielen waren. Daher wurde von weiteren Versuchen dieser Art — man hätte etwa an ein schrittweises Übertragen des Muskels in Räume von immer geringerem Dampfdruck denken können — Abstand genommen.

Was nun ferner die beiläufig erstrebten Aufschlüsse über die Grösse des Dampfdruckes des überlebenden Muskels anbetrifft, so ist hierüber etwa folgendes zu sagen: Da der Muskel im allgemeinen über allen Lösungen ausser über reinem Wasser eine Wasserabgabe zeigte[1]), so möchte man folgern, dass sein Dampfdruck nicht weit von dem des reinen Wassers entfernt sei.

Vielleicht könnte man hier den Einwurf machen, die Dampfspannungen in den Flaschen erreichten die den jeweiligen NaCl-Lösungen entsprechenden Werte nur sehr langsam, weshalb in der ersten Zeit[2]) zunächst auch von seiten des Muskels eine geringe Wasserabgabe stattfinden könne. Dieser Einwand ist aber nicht berechtigt, wie sich aus den folgenden Kontrollversuchen ergab:

Es wurden nämlich statt der Muskeln einfachere freies Wasser bzw. NaCl-Lösungen enthaltende Objekte über den verschiedenen Lösungen für kürzere oder längere Zeit aufgehängt und hinsichtlich ihrer Gewichtsänderungen untersucht. Hierzu wurden kleine Stücke von Watte und Filtrierpapier gewählt, die zuvor längere Zeit in destilliertem Wasser ausgelaugt worden waren, um etwaige Salze zu entfernen. Die Ergebnisse dieser Kontrollversuche sind aus der Tabelle 2 zu ersehen.

---

1) Eine Ausnahme bildet nur Versuch 10 (S. 19, wo der Muskel über einer 0,4%igen Lösung eine Gewichtszunahme zeigte; das war aber nach 48 Stunden, wo der Muskel schon eine erhebliche Zeitschädigung aufwies. (Vgl. hierüber S. 22 oben.)

2) Das heisst bei einer Versuchsdauer von etwa 5 Stunden, die zur Vermeidung von grösseren „Zeitschädigungen" so kurz gewählt wurde.

Tabelle 2.

Versuch		Über Dampfdruck von	Temp. ° C.	Dauer des Versuches	Anfangsgewicht	Endgewicht	Gewichtsdifferenz
1	Watte + Aq. dest.	Aq. dest.	8,4	5 Std.	0,72	0,7196	keine
2	Watte + Aq. dest.	Aq. dest.	21,0	48 Std.	0,7424	0,7492	keine
3	Filtrierpapier + 0,7 % NaCl	0,3 % NaCl	8,4	5 Std.	0,6848	0,6854	Zunahme 0,0006
4	Filtrierpapier + 0,7 % NaCl	0,7 % NaCl	8,4	5 Std.	0,4448	0,4446	keine
5	Filtrierpapier + 0,3 % NaCl	0,7 % NaCl	8,4	5 Std.	0,342	0,3394	Abnahme 0,0026
6	Filtrierpapier + 0,3 % NaCl	0,7 % NaCl	21,0	2 Tage	0,3508	0,3406	Abnahme 0,0102
7	Watte + 0,7 % NaCl	Aq. dest.	25,5	4 Tage	1,902	1,933	Zunahme 0,031
8	Filtrierpapier + 0,7 % NaCl	0,3 % NaCl	25,5	4 Tage	0,674	0,696	Zunahme 0,022

Diese Tabelle lehrt, dass bei einer Versuchsdauer sowohl von 5 Stunden als auch von längerer Zeit die Versuchsobjekte über Flüssigkeiten von gleichem Dampfdruck ihr Gewicht im wesentlichen unverändert liessen, während über Lösungen von höherer Tension auch schon in kürzerer Zeit eine Gewichtszunahme erfolgt und umgekehrt. Daher ist zu folgern, dass das überraschende Verhalten des Muskels wirklich auf einen Dampfdruck hinweist, der erheblich höher als der einer 0,7 %igen NaCl-Lösung ist. Man darf nun nicht etwa glauben, dass dieses Ergebnis demjenigen entspräche, das Höber bei seinen Untersuchungen über die innere Leitfähigkeit des Muskels gewonnen hat, wonach das Wasser des Muskels nicht die Leitfähigkeit einer 0,7 %igen sondern nur diejenige einer 0,1—0,2 %igen NaCl-Lösung habe[1]; denn die Höber'sche Untersuchung gilt dem „Faserwasser"[2], während der Dampfdruck des Gesamtmuskels der seiner „Zwischenflüssigkeit"[3] ist. Das Verhalten dieser beiden Anteile des Muskelwassers erfordert aber im wesentlichen getrennte Erklärungen.

Für den Dampfdruck der Zwischenflüssigkeit und damit des Gesamtmuskels liesse sich vielleicht in der folgenden Weise eine

1) Rud. Höber, Messungen der inneren Leitfähigkeit von Zellen. Pflüger's Arch. Bd. 150 S. 45. 1913.

2) Siehe oben S. 431.

3) Siehe oben S. 431.

Erklärung versuchen: Die Zwischenflüssigkeit zerfällt in zwei Teile, nämlich den, der in der Substanz des Perimysiums gelöst ist, und den, der sich in den kapillaren Räumen der letzteren befindet. Es könnte nun sein, dass nach dem Verteilungssatz die Substanz des Perimysiums nur ein geringes Aufnahmevermögen für Salze hätte, so dass ihr zum Teil wohl sehr locker gebundenes Quellungswasser nur wenig Salze enthielte[1]); diese gedachte, sehr verdünnte Lösung wäre aber ausschlaggebend für den Dampfdruck des Gesamtmuskels.

Der Vollständigkeit halber sei bemerkt, dass nach Eintritt der Totenstarre der Dampfdruck des Muskels möglicherweise merklich abnimmt, sobald nämlich ein Saft vom Gefrierpunkt einer etwa 0,6 %igen NaCl-Lösung ausgepresst wird[1]) und seine Oberfläche überzieht.

IV. Dritte Versuchsreihe: Wasserentziehung des gefrorenen Muskels in einem abgeschlossenen trocknen Luftraum, teils mit, teils ohne hygroskopische Substanz bei konstanten Temperaturen zwischen — 0,8° und — 1,2° C.

Aus den bisherigen Versuchen geht hervor, dass eine gleichmässige und doch genügend schnelle, d. h. ohne grössere Zeitschädigung stattfindende, Austrocknung des Muskels bei Temperaturen über 0° C. nicht zu erreichen ist. Da dies aber unter bestimmten Bedingungen bei Temperaturen unter 0° C. möglich schien, wie man aus den Untersuchungen über das Gefrieren des Muskels und seinen Kältetod schliessen konnte, so wurde hierauf ein neues Austrocknungsverfahren gegründet: Das Gefrieren eines Muskels kann man nämlich gewissermaassen als ein Austrocknen auffassen, wie ja auch von vielen Autoren, besonders von Pflanzenphysiologen, der Kältetod als ein Austrocknungstod angesehen wird. Bei dieser Art der Austrocknung wird nun freilich das Wasser nicht aus dem Muskel herausbefördert, sondern bleibt zwischen den relativ ausgetrockneten Teilen, mit denen es vorher in Lösungsbeziehungen stand, jetzt in fester Ausscheidung liegen[2]). Wenn nun der Muskelmasse durch

1) Siehe P. Jensen, Zur Analyse der Abkühlungskurve des Muskels und einiger anderen Körper. Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. 14 S. 349. 1913.

2) Siehe hierüber auch die soeben erschienenen Untersuchungen von Karl Reuter, Über die histologischen und geschmacksphysiologischen Veränderungen gefrorener Fische. Abhandl. zur Volksernährung Heft V. Verlag der Zentraleinkaufsgesellschaft. Berlin 1916.

Gefrieren tatsächlich der grösste Teil ihres Wassers in der angegebenen Weise entzogen werden kann, ohne dass sie erheblich geschädigt wird (s. Jensen-Fischer und Brunow), so lässt sich das nur so auffassen, dass der Muskel bei den entsprechenden Temperaturen trotz solch grossen „Wasserverlustes" seine Lebensfähigkeit behält. Demnach stellt ein nicht zu weitgehendes Gefrieren eine sehr schonende Art der Wasserentziehung dar, und es liegt nahe, von diesem Verhalten des Muskels in der Weise Gebrauch zu machen, dass man das ausgefrorene Wasser nun auch noch aus dem Muskel herausbefördert. Auf Grund dieser Überlegung wurden im wesentlichen zwei verschiedene Versuchsreihen ausgeführt:

1. Vorversuche zur vorläufigen Orientierung:
   a) Austrocknen des Muskels in abgeschlossenen lufthaltigen Röhren, die in ein konstantes Kältebad versenkt waren;
   b) dasselbe in Röhren, die zum Zwecke der Austrocknung des Muskels P_2O_5 enthielten.

2. Der vorher in einem mit Wasserdampf gesättigten Raum rasch zum Gefrieren gebrachte Muskel wird erst im gefrorenen Zustande ausgetrocknet:
   a) In einer abgeschlossenen lufthaltigen Röhre;
   b) zur intensiveren Austrocknung des Muskels in einer Röhre, die P_2O_5 enthielt;
   c) zur Untersuchung der Lebensfähigkeit wird dem zuerst ausgetrockneten Muskel noch im gefrorenen Zustande das Wasser wieder ersetzt.

Da in diesen Versuchsreihen die Muskeln zum Zwecke einer weitergehenden Austrocknung längere Zeit im gefrorenen Zustande zwischen — 0,8° und — 1,2° C. verweilen mussten, so erhob sich die Frage, ob nicht hierdurch schon, auch ohne Wasserverlust, eine beachtenswerte Schädigung herbeigeführt werde. Denn es war bisher nur festgestellt worden, dass ein verhältnismässig kurz dauernder Gefrierzustand bei den genannten Temperaturen gut ertragen wird. Diese Vorfrage musste also zunächst beantwortet werden. Als Ergänzung hierzu wurden dann auch die Folgen längerdauernden, mässigen Unterkühltseins für den Muskel untersucht. Und eine weitere Vorfrage ergab sich ferner dadurch, dass in diesen Versuchen auch die Abhängigkeit der Lebensfähigkeit des Muskels von seinem Wassergehalt untersucht werden sollte, d. h. die Frage, ob und

innerhalb welcher Grenzen ein durch Austrocknen unerregbar gewordener Muskel seine Erregbarkeit durch Wasserzufuhr wiedergewinnen kann. Da hierbei die zuvor ausgetrockneten Muskeln längere Zeit in kalter — auch unterkühlter — Ringer-Lösung gehalten wurden, so war zuvor zu ermitteln, welche Folgen eine länger dauernde Einwirkung dieser und anderer Lösungen bei nicht ausgetrockneten, frischen Muskeln haben.

a) Zur allgemeinen Methodik dieser Versuchsreihe.

Bei diesen Versuchen kam es darauf an, die Muskeln längere Zeit auf konstanten Temperaturen unterhalb ihres Gefrierpunktes zu halten. Da der Gefrierpunkt des frischen Froschmuskels zwischen — 0,4 ° C. und — 0,5 ° C. liegt, und da erst bei einer Abkühlung unterhalb — 1,5 ° C. sich grössere Schädigungen der Muskeln von R. fusca und arvalis entwickeln[1]), so wurden für das Kältebad, das die Temperatur des Muskels während seiner Austrocknung bestimmte, Temperaturen zwischen — 0,8 ° C. und — 1,2 ° C. gewählt. Sie wurden dadurch erzielt, dass als Kältebad für die die Muskeln enthaltenden Gefässe Kochsalzlösungen verwendet wurden, die ihren Gefrierpunkt bei der gewünschten Temperatur hatten; bringt man eine solche Kochsalzlösung nämlich in eine geeignete Kältemischung (Eis-Kochsalz), so lässt sich infolge des Antagonismus von Wärmeentziehung und Produktion von Schmelzwärme (Kristallisationswärme) bei Anwendung bestimmter Vorkehrungen und bei genügender Überwachung die Temperatur beliebig lang auf dem Gefrierpunkt der betreffenden Kochsalzlösung erhalten.

Die Versuchsanordnung war im wesentlichen die folgende (s. Fig. 1, S. 25): Eine grössere Holzkiste und ein etwas kleinerer Behälter aus Glas wurden ineinandergestellt und die Zwischenräume zum Schutz gegen Temperaturausgleichung mit Holzwolle ausgefüllt. In diesen Glasbehälter wurde ein Gefäss aus Weissblech[2]) gestellt, das die als Bad dienende Kochsalzlösung enthielt und von einer Kältemischung aus Kochsalz und gestossenem Eis umgeben war. Die als Bad benutzte Kochsalzlösung hatte anfangs 1,5 %, also einen Gefrier-

1) H. Brunow, Der Kältetod des isolierten und durchbluteten Froschmuskels. Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. 13 S. 368. 1912.

2) Das zylindrische Gefäss war 35 cm hoch bei einem Durchmesser von 20 cm.

punkt von ca. — 0,9 ° C.[1]). Da durch Verdampfen die Lösung allmählich konzentrierter wurde und damit auch der Gefrierpunkt sank, wurde von Zeit zu Zeit die Lösung verdünnt und der Gefrierpunkt kontrolliert. Auf diese Weise bekamen wir für die verschiedenen Versuche Temperaturen zwischen — 0,8 ° C. und — 1,2 ° C. Für die Dauer jedes einzelnen Versuches jedoch war die Temperatur

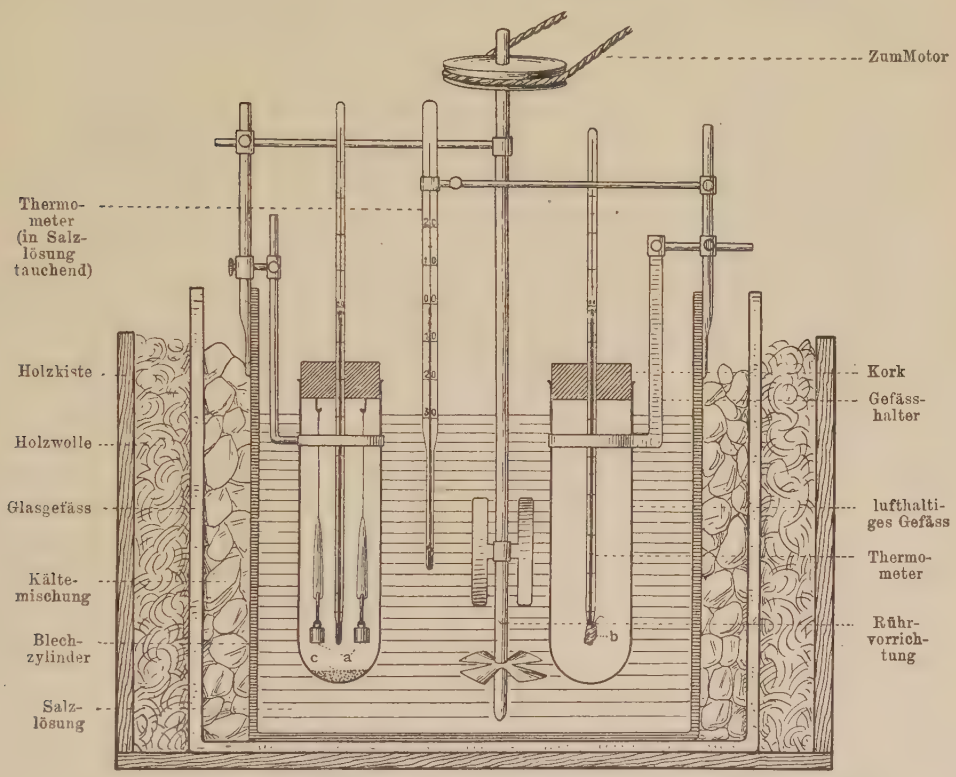

Fig. 1. *a* Muskeln in lufthaltiger Röhre freihängend über P_2O_5 (*c*), *b* Muskel in lufthaltiger Röhre um Thermometer gewickelt (*b*).

konstant. Der Konstanterhaltung der Temperatur und ihrer Gleichmässigkeit innerhalb des Bades diente eine Rührvorrichtung, die durch einen in 5 m Entfernung befindlichen Heissluftmotor angetrieben wurde. Der Rührer war mittels einer Muffe an einer Stange angebracht, die an das Blechgefäss angelötet war. In derselben Weise

1) Nach Landolt-Börnstein, Physikalisch-chemische Tabellen, 4. Aufl., S. 811. Berlin 1912, hat eine NaCl-Lösung von 1,479 % einen Gefrierpunkt von — 0,8615 ° C.

war das zur Temperaturmessung des Bades dienende Thermometer befestigt.

Es sei hier schon erwähnt, dass in solchen Fällen, wo der Muskel recht schnell auf seinen Gefrierpunkt bzw. zum Gefrieren gebracht werden sollte, die Abkühlung zuerst in einem Beckmann'schen Apparat geschah, aus dem er dann in das mildere konstante Kältebad übergeführt wurde. Die Versenkung des auszutrocknenden Muskels in das Kältebad geschah in zweierlei verschiedener Weise:

1. Das eine Verfahren bestand darin, dass der mit einem kleinen Gewicht belastete Muskel in einer weiten Glasröhre frei aufgehängt wurde, und zwar an einem Häkchen, das sich an der Unterfläche des Verschlusskorkes befand. Die Röhre war eine solche, wie sie beim Beckmann'schen Apparat als Luftmantel für das die zu untersuchende Substanz enthaltende Probierrohr dient[1]). Gehalten wurde das Rohr mittels eines an der Stange des Blechgefässes angebrachten Kupferringes. Durch ein Thermometer, das durch den Verschlusskork der Röhre hindurchgesteckt war, wurde die Temperatur gemessen. Bei diesem Verfahren liessen sich nun aber die Temperaturänderungen nicht verfolgen, die der Muskel bei der Abkühlung auf die Temperatur, bei der er ausgetrocknet werden sollte, durchlief; insbesondere konnte so ohne Temperaturmessung des Muskels nicht erkannt werden, ob er bei der Abkühlung unter seinen Gefrierpunkt auch wirklich gefror, oder ob er etwa unterkühlt blieb. Denn es ist ja bekannt, dass Froschmuskeln sehr häufig die Erscheinung der Unterkühlung zeigen, die bis zu — 7 ° C. beobachtet worden ist[2]). Bei Gelegenheit meiner eigenen Versuche machte ich hierüber im allgemeinen folgende Erfahrungen: In dem gelinden Kühlbad von — 0,8 ° C. bis — 1,2 ° C. blieben die Sartorien in etwa 50 % aller Fälle viele Stunden lang unterkühlt, wenn man sie sich selbst überliess. Da, wo bei solchem Kältebad das Gefrieren eintrat, erfolgte es entweder alsbald beim Gefrierpunkt oder nach einer nur geringen Unterkühlung. Im Beckmann'schen Apparat dagegen liess sich bei intensiverer Kälte stets in relativ kurzer Zeit nach mehr oder weniger Unterkühlung ein Gefrieren des Muskels erzielen.

1) In kleineren Gefässen war die Wasserabgabe des Muskels zu gering und langsam.

2) Siehe P. Jensen, Weitere Untersuchungen über die thermische Muskelreizung. Pflüger's Arch. Bd. 160 S. 375. 1915.

Um bei der oben geschilderten Versuchsanordnung festzustellen, ob der Muskel, wie es für die nachfolgende Austrocknung gewünscht wurde, auch wirklich gefroren war oder ob nur Unterkühlung vorlag, musste die Röhre mit dem Muskel von Zeit zu Zeit so weit aus dem Kältebad herausgehoben werden, damit man durch die Wand hindurch das Präparat besichtigen konnte, dessen Aussehen mit Sicherheit erkennen liess, ob es gefroren war oder nicht. Wenn man so nun auch keinen genaueren Aufschluss über die jeweilige Temperatur des Muskels erhielt, so gewährte doch das in demselben Luftraum mit dem Präparat befindliche Thermometer einen gewissen Anhalt hierfür: Die Temperatur des Muskels konnte, von bestimmten Ausnahmen abgesehen[1]), nicht niedriger sein, als dieses Thermometer anzeigte. Ein derartiger Anhaltspunkt war dann besonders wichtig, wenn die Muskeln, die man im schärferen Kühlbad des Beckmann'schen Apparates rasch zum Gefrieren bringen wollte, zuerst grössere Unterkühlungen zeigten, deren Grad man ungefähr zu kennen wünschte. In diesen Fällen konnte man, abgesehen von den genannten Ausnahmen (s. Anm. 1), annehmen, dass der Muskel vermöge seiner grösseren spezifischen Wärme stets eine etwas höhere Temperatur besass als die ihn umgebende Luft, über die das Thermometer Aufschluss gab.

2. Um die Temperatur des Muskels stets verfolgen zu können und damit festzustellen, wann er gefroren war und ob und wie weit er etwa unterkühlt war, wurde bisweilen ein anderes Verfahren eingeschlagen. Der Sartorius oder auch zwei dieser Muskeln wurden so an das Quecksilbergefäss des Thermometers angelegt, dass sie dieses mit möglichst grossen Flächen bedeckten[2]) und seine Temperatur in erheblichem Maasse beeinflussten; auf diese Weise vermochte man mittels des Thermometers die Temperaturänderungen des sich etwa unterkühlenden Muskels so weit zu ermitteln, dass sich mit Sicherheit erkennen liess, ob und wie weit das Präparat unter seinen Gefrierpunkt unterkühlt wurde und wann es gefror: Bekanntlich kann man unter geeigneten Bedingungen aus dem zeitlichen Verlauf

1) Die Temperatur des Muskels kann um wenige Zehntel Grade unter die des umgebenden Luftraumes sinken, wenn der Muskel, nachdem er die Temperatur des letzteren erreicht hat, noch eine beträchtliche Wasserverdunstung mit entsprechender Verdunstungskälte erfährt.

2) Für unsere Zwecke genügte vorläufig dieses einfache Verfahren, das bei weitergehenden Anforderungen durch thermoelektrische Messung zu ersetzen wäre.

der Temperaturabnahme des Muskels, wie ihn die Abkühlungskurve veranschaulicht, erkennen, ob sein Wasser bei der Abkühlung auf seinen Gefrierpunkt, der bei etwa — 0,45 ° C. liegt, wirklich zu Eis erstarrt oder ob es auch unterhalb des Gefrierpunktes noch kürzere oder längere Zeit flüssig bleibt. Im letzteren Falle nämlich erhält man, wenn nicht etwa sonstige exo- oder endothermische Prozesse auftreten, die normale Abkühlungskurve, die eine Exponentialkurve ist; und auch unter den angeführten etwas komplizierteren Bedingungen, d. h. bei der nicht ganz vollständigen Bedeckung des Thermometer-

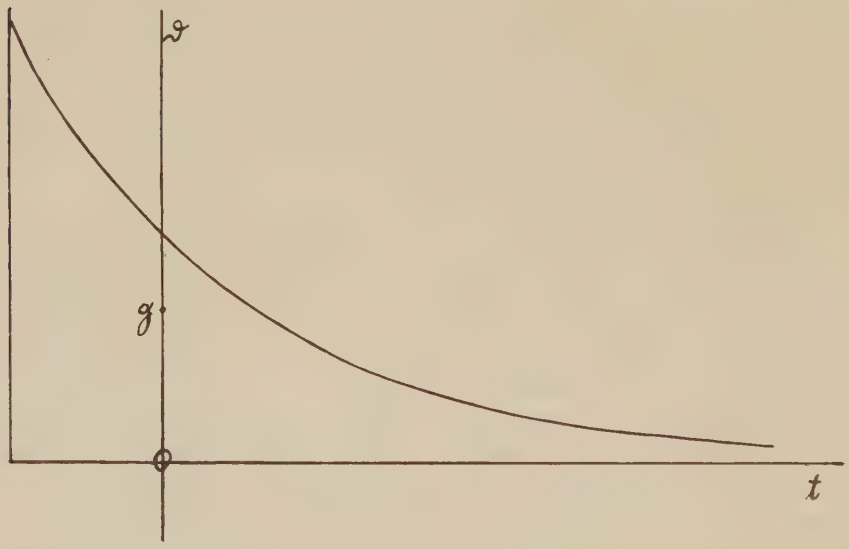

Fig. 2. Normale Abkühlungskurve = Exponentialkurve ($\vartheta = e^{-t}$). $o\,\vartheta$ = Temperaturachse; $o\,t$ = Zeitachse. Bei g ist der Gefrierpunkt der Flüssigkeit angenommen.

gefässes mit Muskelmasse, tritt im Falle der Unterkühlung eine Kurve vom bezeichneten Typus auf. Anders, wenn Gefrieren (oder ein anderer exothermischer Prozess) stattfindet. Erfolgt dieses sofort bei Erreichung des Gefrierpunktes, so ändert jetzt die Abkühlungskurve ihren Charakter, und zwar in besonders auffallender Weise dann, wenn die beim Gefrieren frei werdende Schmelzwärme (Kristallisationswärme) nicht zu spärlich ist im Vergleich zu der gleichzeitig in das Kältebad abfliessenden Wärmemenge; dann nämlich wird die Kurve im Moment des Gefrierens horizontal und bleibt es, solange die durch das Kältebad entzogene Wärmemenge nicht grösser ist als

die in der gleichen Zeit produzierte. Zur Erläuterung dieser Verhältnisse diene ein Vergleich von Fig. 2 und 3[1]).

Die geschilderten Unterschiede im Verlaufe der Abkühlung des Muskels zeigen sich also bei der Beobachtung des Thermometers unmittelbar darin, dass dieses bei der Unterkühlung auch abwärts vom Gefrierpunkt dauernd weitersinkt, während es im Falle des Gefrierens ohne Unterkühlung zunächst bis zum Gefrierpunkt stetig fällt, dann

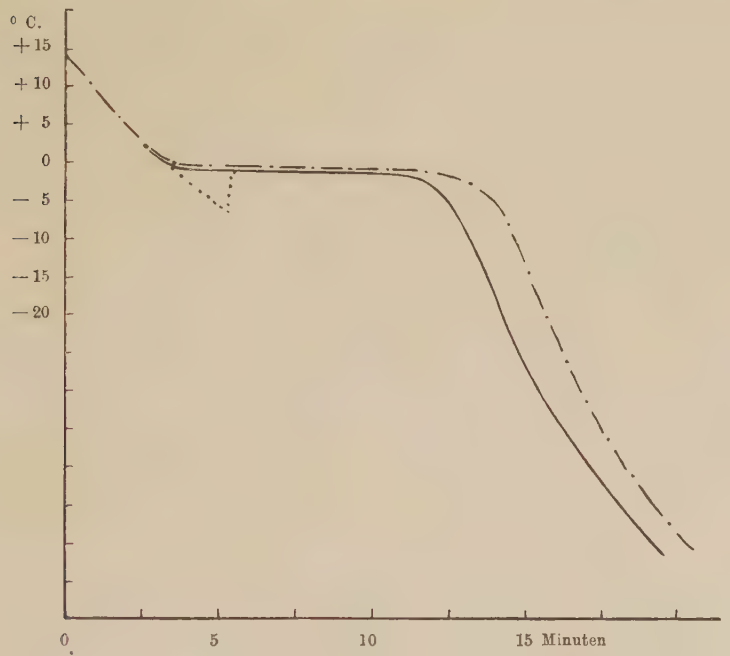

Fig. 3. Abkühlungskurven gefrierender Körper („Gefrierkurven“).
—·—·— 0,7 %ige NaCl-Lösung. ——— frischer Froschmuskel von derselben Masse, gefrierend. ····· unterkühlter Froschmuskel.

eine Zeitlang stehenbleibt[2]), um endlich mit verhältnismässig grösserer Geschwindigkeit[3]) weiterzusinken; findet das Gefrieren

1) Näheres hierüber bei Jensen und Fischer, l. c. S. 30ff. und S. 44ff.

2) Das heisst wenn, wie oben vorausgesetzt, die abfliessende Wärmemenge nicht grösser ist als die produzierte Schmelzwärme.

3) Das kommt besonders daher, dass die spezifische Wärme des Eises nur noch die Hälfte derjenigen des flüssigen Wassers beträgt; siehe hierüber auch Jensen und Fischer, l. c. S. 36f. Über sonstige mitwirkende Ursachen siehe P. Jensen, Zur Analyse der Abkühlungskurve des Muskels und einiger anderen Körper. Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. 14 S. 321. 1913.

nach vorausgegangener Unterkühlung statt, so steigt das Thermometer von der Unterkühlungstemperatur plötzlich auf die Gefriertemperatur, wo es dann verweilt, wie dies in dem punktierten Teil der Kurve von Fig. 3 angedeutet ist.

b) Zur Beantwortung der beiden Vorfragen.

1. Einfluss länger dauernden Gefrorenseins und Unterkühltseins des Muskels bei Temperaturen zwischen —0,8° C. und —1,2° C.

Versuch 13. 14. September 1915. Sartorius von R. arvalis. Zimmertemperatur 15,8° C. Froschtemperatur 15,5° C. Zuckungshöhe 5,5 cm[1]).

3h 32′. Der Muskel wird in einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre am Thermometer klebend im Beckmann'schen Apparat zum Gefrieren gebracht. Kältemischung im Beckmann'schen Apparat —6,8° C.

3h 42′. Muskel gefroren, nachdem zunächst Unterkühlung, wobei das Thermometer, dem der Muskel anlag, bis auf —4,2° C. sank. Dies war aber der Mittelwert aus der Temperatur des Muskels und des kühleren Luftraumes; die Temperatur des Muskels darf entsprechend dem S. 451 Dargelegten als weniger niedrig angenommen werden. Dasselbe gilt auch für die Temperatur des Muskels beim nachfolgenden Gefrieren, wobei das Thermometer —0,8° C. anzeigte[2]). Die Röhre wird mit dem gefrorenen Muskel jetzt in das konstante Bad von —1° C. versenkt.

15. September 1915.

11h 30′. Die Röhre mit dem Muskel wird aus dem Bad herausgenommen, so dass der Muskel bei Zimmertemperatur auftauen kann. Der aufgetaute Muskel zeigt sich bei der Reizung unerregbar. Er wird in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur bei Durchleitung von Sauerstoff gebracht.

3h 00′. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) 3 cm.

16. September 1915.

2h 15′. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) 3,5 cm. Die Lösung wird jetzt gewechselt.

6h 30′. Zuckungshöhe 4,6 cm.

Dieser Versuch lehrt also, dass ein Muskel, der kurze Zeit bis gegen —4° C. unterkühlt und danach etwa 20 Stunden lang bei —1° C. im gefrorenen Zustande gehalten war, nach dem Auf-

1) Wie schon erwähnt, s. S. 24, verstehen wir unter Hubhöhe oder Zuckungshöhe die Verkürzung des Muskels bei sechsfacher Hebelvergrösserung.

2) Bekanntlich ist die normale Gefriertemperatur des Froschmuskels nur etwa halb so niedrig; s. auch S. 24.

tauen unerregbar ist, dass er aber bei länger dauernder Einwirkung von zimmerwarmer, sauerstoffhaltiger Ringer-Lösung seine Erregbarkeit und nahezu ursprüngliche Leistungsfähigkeit wiedergewinnt. Da nun, wie wir noch sehen werden, eine kurzdauernde Unterkühlung des Muskels auf etwa — 4° C. keine grössere Schädigung setzt, so ist das 20stündige mässige Gefrorensein als Ursache seines reversiblen Erregbarkeitsverlustes anzusehen.

Versuch 14. 9. Mai 1916. Sartorius von R. arvalis, die seit 8 Tagen im Zimmer gehalten. Zimmertemperatur 17,5° C. Reizschwelle (für Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A.: 400. Zuckungshöhe (sechsfache Vergrösserung) 5 cm.

12h 15′. Muskel, in feuchter Röhre hängend, in Beckmann'schen Apparat gebracht; Kältemischung — 5° C.

12h 59′. Muskel, welcher am Thermometer angebracht war, ist jetzt gefroren. Die Unterkühlung betrug — 2,4° C., doch war das Thermometer nicht vollständig von Muskelmasse bedeckt. Die Röhre wird rasch in das konstante Bad von — 1,2° C. gebracht.

9h 29′. Temperatur in Röhre zeigt — 1,2° C. Der gefrorene Muskel wird in der Röhre der Zimmertemperatur ausgesetzt.

9h 55′. Temperatur in der Röhre jetzt 15° C. Der Muskel wird jetzt auf seine Erregbarkeit geprüft, welche sehr gering. Zuckungshöhe 0,4 cm. Der Muskel wird in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur gehängt.

10. Mai 1916.

11h 55′. Zuckungshöhe des Muskels (sechsfache Vergrösserung) 4,9 cm. Muskel hat normales Aussehen.

Dieser Versuch hatte im wesentlichen dasselbe Ergebnis wie der vorige. Nach einer kurzdauernden Unterkühlung bis nur etwa — 2° C. und einem fast neunstündigen Gefrorensein bei — 1,2° C. zeigte der Muskel nur noch einen kleinen Rest seiner ursprünglichen Erregbarkeit und Leistungsfähigkeit, gewann diese aber nach Behandlung mit Ringer-Lösung wieder. Da es auffallend schien, dass der Sartorius durch mehrstündiges Gefrieren seiner Erregbarkeit fast völlig beraubt wurde, die erst durch Behandlung mit Ringer-Lösung in vollem Umfange wiederkehrt, so konnte man daran denken, dass dieser Muskel vielleicht überhaupt dem Gefrieren gegenüber weniger widerstandsfähig sei als der Gastrocnemius. Daher wurden entsprechend den Versuchen von Jensen-Fischer (l. c.) und Brunow (l. c.) am Gastrocnemius von mir mit dem Sartorius Versuche über die Wirkung kurzdauernden Gefrorenseins bei — 1° C. ausgeführt. Es machten sich hier zwar zunächst nach dem Auftauen

geringe Schädigungen bemerkbar, die auch erst nach Behandlung mit Ringer-Lösung verschwanden; im wesentlichen aber verhielt sich der Sartorius bei kurzdauerndem Gefrorensein bei — 1 ° C. so wie der Gastrocnemius.

Versuch 15. 10. Mai 1916. Sartorius von R. arvalis. Zimmertemperatur 15 ° C. Froschtemperatur 13 ° C. Hubhöhe (sechsfache Vergrössserung) 6 cm. Reizschwelle bei R.-A. 430.

12 h 24′. Muskel wird in feuchter Röhre, am Thermometer klebend, im Beckmann'schen Apparat (Kältemischung — 6 ° C.) zum Gefrieren gebracht.

12 h 34′. Muskel nach Unterkühlung von — 1 ° C. gefroren. Temperatur steigt bis — 0,7 ° C. Es wurde mit dem Herausnehmen so lange gewartet, bis das Thermometer wieder fiel, d. h. bis das Wasser des Muskels zum grössten Teil auskristallisiert war.

12 h 40′. Temperatur sinkt langsam.

12 h 45′. Temperatur — 1 ° C. Muskel also grösstenteils durchgefroren. Die Röhre wird jetzt aus dem Bad herausgenommen und bei Zimmertemperatur zum Auftauen gebracht.

2 h 20′. Das Thermometer ist seit einiger Zeit auf Zimmertemperatur. Reizung des Muskels ergiebt eine Zuckungshöhe von 3 cm. Muskel wird jetzt in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur gehängt.

9 h 00′. Zuckungshöhe 5,1 cm.

Da es von Interesse ist, auch die Wirkungen länger dauernden mässigen Unterkühltseins auf den Sartorius kennenzulernen, so seien auch hierüber zwei Versuche mitgeteilt:

Versuch 16. 25. August 1915. Sartorius von R. fusca. Zimmertemperatur 18 ° C. Froschtemperatur 17,5 ° C. Gewicht des Muskels 0,1572 g. Zuckungshöhe (sechsfache Vergrösserung) 6,7 cm.

11 h 40′. Muskel in feuchter Röhre (Wände mit Filtrierpapier ausgekleidet) über Aqua dest. im Beckmann'schen Apparat bis — 1 ° C. abgekühlt; Kältemischung — 10 ° C.

11 h 46′. Lufttemperatur in der Röhre beträgt jetzt — 1 ° C. Muskel, der nicht gefroren, jetzt rasch in einer vorgekühlten, trockenen[1]) Röhre in das konstante Kühlbad von — 1 ° C. versenkt.

9 h 19′. Der unterkühlt gebliebene Muskel wird in ein Wägefläschchen gebracht und gewogen. Gewicht 0,148 g. Gewichtsverlust ca. 6 %.

---

1) Die „Trockenheit" der Röhre und die geringe Austrocknung des Muskels sind unwesentlich für diesen Versuch.

9h 30′. Der inzwischen auf Zimmertemperatur erwärmte Muskel wird in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur aufgehängt bei Durchströmung mit reinem Sauerstoff.

9h 42′. Zuckungshöhe 2,3 cm.

9h 52′. Zuckungshöhe 2,6 cm.

26. August 1915.

12h 15′. Zuckungshöhe 5,0 cm.

Dieser Versuch zeigt, dass eine 9½ stündige Unterkühlung auf —1° C., auch bei einem mässigen Wasserverlust, zwar eine recht beträchtliche aber grösstenteils reversible Schädigung bedingt.

Versuch 17. 9. Mai 1916. Sartorius von R. arvalis. Zimmertemperatur 17,5° C. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) 4,5 cm. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) R.-A. 425.

1h 19′. Muskel, in feuchter Röhre hängend, in Beckmann'schen Apparat gebracht; Kältemischung —5° C. Der Muskel wird so lange im Kühlbad gelassen, bis die Lufttemperatur in der Röhre —1,2° C. betrug.

1h 26′. Der Muskel wird jetzt rasch in das konstante Kühlbad von 1,2° C. überführt. Er ist nicht gefroren.

9h 28′. Die Röhre mit dem darin befindlichen unterkühlten Muskel wird aus dem Kältebad genommen und der Zimmertemperatur ausgesetzt.

9h 55′. Temperatur in der Röhre = Zimmertemperatur. Reizung des Muskels erfolglos, er wird in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur gehängt.

10. Mai 1916.

12h 00′. Zuckungshöhe des Muskels (bei sechsfacher Vergrösserung) 4,3 cm.

Dieser Versuch zeigt eine bis zur Unerregbarkeit führende, aber fast völlig reversible Schädigung.

Als Anhang zu dem letzten Versuch sei hier das Ergebnis eines Versuches an einem Sartorius mitgeteilt, der nach längerem Unterkühltsein statt in Ringer-Lösung in eine feuchte Röhre gebracht wurde. Es sollte nachgesehen werden, ob er sich auch hier im Laufe von mehreren Stunden erhole. Das war nicht der Fall, wohl aber trat bei späterer Übertragung in Ringer-Lösung wieder eine weitgehende Erholung ein.

2. Folgen länger dauernder Einwirkung kalter (auch unterkühlter) Ringer-Lösung für den Muskel.

Es wurden die Wirkungen einiger „physiologischer" Lösungen von Salzgemischen, wie sie für Zwecke der vorliegenden Art gebräuchlich sind, untersucht und beiläufig die Gefrierpunkte der Lösungen bestimmt. Hierbei ergab sich, dass die Locke'sche Lösung einen Gefrierpunkt von — 0,58° C. und die Goethlin'sche Lösung einen solchen von — 0,45° C. besass, während die Ringer'sche Lösung (bei einem Gehalt von 0,6% NaCl, 0,02% KCl, 0,02% $CaCl_2$ und 0,05% $NaHCO_3$)[1]) ihren Gefrierpunkt bei — 0,41° C. hatte. Für unsere Zwecke eignete sich am besten diese Ringer-Lösung bei Durchströmung mit reinem Sauerstoff.

Da, wo es darauf ankam, möglichst niedrig temperierte Ringer-Lösung zu verwenden, benutzten wir eine solche, die auf — 1° C. unterkühlt war. Eine derartige Unterkühlung stellte sich nämlich in der Regel ein und erhielt sich, wenn die Lösung in einer Röhre in einem konstanten Kühlbad von — 1° C. gehalten wurde.

Über die Folgen mehrstündiger Einwirkung einer solchen unterkühlten Ringer-Lösung giebt der nächste Versuch Aufschluss.

Versuch 18. 21. Juli 1916.

11h 15′. Sartorius von R. arvalis. Zimmertemperatur 19,5° C. Froschtemperatur 17,5° C. Zuckungshöhe (sechsfache Vergrösserung) 7 cm. Reizschwelle 225. Der Muskel wird in vorher unterkühlter (— 1° C.) Ringer-Lösung hängend mitsamt dem Gefäss in das konstante Kühlbad von — 1° C. gebracht. Beide, Muskel und Ringer-Lösung, sind nicht gefroren.

12h 00′. Gleich nach dem Herausnehmen aus der Ringer-Lösung betrug die Hubhöhe 6 cm. Der auf — 1° C. unterkühlte Muskel hatte bei der rasch ausgeführten Reizung sich nur wenig erwärmen können. Muskel wird wieder in dieselbe Ringer-Lösung gehängt.

4h 00′. Zuckungshöhe 6,3 cm.

7h 00′. Zuckungshöhe 7,0 cm.

22. Juli 1916.

12h 00′. Zuckungshöhe 6,5 cm. Temperatur des Muskels und der Lösung noch ca. — 1° C., welche jetzt aber allmählich steigt.

6h 00′. Zuckungshöhe 6 cm.

---

1) Das ist die Zusammensetzung der im hiesigen Physiologischen Institut gebräuchlichen Ringer-Lösung, neben der auch etwas anders zusammengesetzte Ringer-Lösungen probiert worden waren.

23. Juli 1916.

11^h 45′. Zuckungshöhe 7 cm. Die Temperatur des Muskels und der Ringer-Lösung jetzt auf 9° C. gestiegen.

4^h 00′. Zuckungshöhe 8 cm. Temperatur der Lösung und des Muskels 11° C.

24. Juli 1916.

12^h 30′. Zuckungshöhe 1,6 cm. Muskel zeigt Anfänge der Totenstarre. Nach Übertragung in frische Ringer-Lösung zwar etwas besser erregbar, aber nicht nennenswert.

Dieser Versuch lehrt also, dass ein Muskel im unterkühlten Zustande in unterkühlter Ringer-Lösung von — 1° C. mindestens 24 Stunden lang seine normale Leistungsfähigkeit bewahrt.

c) Versuche und Ergebnisse.

1. Vorversuche zur vorläufigen Orientierung.

aa) Gefrieren und Austrocknen in trockner Röhre.

In diesen Versuchen wurde der Muskel in einem grösseren, trocknen Glasrohr[1]), wie auf S. 450 geschildert, ausgetrocknet. Er wurde in der Röhre, die schon vorher in das konstante Bad versenkt worden und so vorgekühlt war[2]), frei aufgehängt, in einzelnen Versuchen so, dass Luft von aussen zutreten konnte. Ferner wurden Versuche derart ausgeführt, dass zum Zwecke einer schärferen Austrocknung des Muskels 3—5 g Phosphorpentoxyd (P_2O_5) an den Boden der geschlossenen Röhre gebracht wurden. Der Muskel verweilte mehrere Stunden in dem Bad, wurde dann herausgenommen, in ein kleines Wägefläschchen gebracht, um ihn vor Wasserniederschlägen und weiterem etwaigen Wasserverlust zu schützen, und mitsamt diesem Fläschchen gewogen. Hierbei wurde festgestellt, ob der Muskel auch wirklich gefroren[3]) war, und nur solche Präparate wurden berücksichtigt. Nachdem der Muskel aufgetaut war, wurde er gereizt und seine Hubhöhe usw. gemessen. Zur Erholung kam er sodann in Ringer-Lösung, worin er je nach den Umständen eine halbe bis mehrere Stunden verblieb. Während und nach dieser

---

1) In kleineren Gefässen war die Wasserabgabe des Muskels zu gering und langsam.

2) Wurde der Muskel zunächst im Beckmann'schen Apparat abgekühlt, s. oben S. 450, so kam er in der hierbei gebrauchten Röhre auch in das Dauerkühlbad.

3) Vgl. oben S. 26.

Zeit wurde dann wieder seine Erregbarkeit und Leistungsfähigkeit geprüft. Einige Versuche seien etwas ausführlicher mitgeteilt und im übrigen die Ergebnisse in Form einer Tabelle dargestellt.

Versuch 19. 25. Juni 1915. Sartorius von R. fusca. Gewicht des Muskels 0,1056 g. Zimmertemperatur 21,6° C. Froschtemperatur 19,8° C. (Die Frösche der folgenden drei Versuche befanden sich seit mehreren Tagen im Zimmer). Zuckungshöhe des Muskels (sechsfache Vergrösserung) 5,3 cm. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A. 230.

12h 05′. Der Muskel wird in trockner Röhre in das konstante Bad von — 1° C. gebracht, wo er alsbald gefriert.
3h 40′. Aus dem konstanten Bad genommen.
3h 50′. Nach 10 Minuten Auftauen Reizschwelle bei R.-A. 85.
4h 00′. Keine Zuckung mehr bei R.-A. = 0.
4h 05′. Gewicht des Muskels 0,0556 g. Gewichtsverlust ca. 46 %. Der Muskel wird jetzt in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur gehängt.
4h 15′. Schon nach 10 Minuten wieder deutlich erregbar. Reizschwelle bei R.-A. 85.

Versuch 20. 25. Juni 1915.

11h 00′. Zimmertemperatur 21,6° C. Froschtemperatur 19,8° C. Gewicht des Sartorius von R. arvalis 0,1052 g. Länge des Muskels 3,8 cm. Hubhöhe (sechsfache Vergrösserung) 5,3 cm. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A. 225.
12h 00′. Muskel wird in trockener Röhre in das konstante Bad von — 1° C. gebracht, wo er alsbald gefriert.
2h 20′. Aus dem Kältebad. Nach dem Auftauen, welches in etwa 20 Minuten erfolgte, bei 90 R.-A. kaum merkbare Zuckungen.
3h 05′. Keine Zuckung mehr. Gewicht des Muskels jetzt 0,056 g. Gewichtsverlust 46,3 %.
3h 30′. Der Muskel hat sich nach 25 Minuten in Ringer-Lösung merklich erholt. Reizschwelle bei R.-A. 90.

(Tabelle 3 siehe S. 37.)

Die mitgeteilten Versuche zeigen, dass ein Sartorius unter den angegebenen Bedingungen etwa um 20 % seines Gewichtes ausgetrocknet werden kann (vgl. Tab. 3, Versuch 31, 37, 39, 40 und 41), ohne erheblich geschädigt zu werden, und dass er auf diese Weise 43—47 % seines Gewichtes einbüssen kann, ohne seine Erregbarkeit irreversibel völlig zu verlieren. Hierbei ist aber zu beachten, dass bei diesen Versuchen, wo der Muskel sich von Anfang an in einer trocknen Röhre und zwar zunächst bei Zimmertemperatur befand, ein Teil der Wasserabgabe schon bei Temperaturen oberhalb 0° C. und vor der Erreichung des Gefrierzustandes erfolgte; in vielen Fällen war die Röhre zwar vorgekühlt, bis aber der Muskel die

Tabelle 3.

Versuch Nr.	Kältebad ° C.	Zimmertemperatur ° C.	Froschtemperatur ° C.	Gewicht des Muskels g	Maxim. Zuckung (Anfangshubhöhe)	Reizschwelle (bei R.-A.)	Austrocknungsraum	Austrocknungsdauer	Gewichtsverlust %	Maxim. Zuckung d. wasserarmen Muskels	Zeit in Ringer-Lösung zur Erholung	Reizschwelle (bei R.-A.)	Maxim. Zuckung des erholten Muskels
2	— 0,8	19,5	17,0	0,086	5,5	210	trockne Röhre	3¾ h	30,2	—	2¼ h	175	—
4	— 1,0	20,0	19,0	0,093	5,5	225	do.	3¾ h	40,0	—	24 h	220	—
5	— 0,8	22,0	20,0	0,086	5,4	220	do.	3¾ h	34,0	—	19 h	170	—
6	— 0,8	22,0	20,0	0,095	5,3	225	freie Luft	55′	46,3	—	25′	85	—
10	— 1,0	21,6	19,8	0,109	—	225	trockne Röhre	3 h	43,6	—	15′	120	—
28	— 0,8	19,0	17,5	0,0886	4,0	225	do.	2¼ h	23,7	—	17 h	180	1,5
29	— 0,8	19,0	17,5	0,0896	3,9	200	do.	2¼ h	29,6	—	17 h	180	3,0
31	— 1,0	18,5	17,0	0,1138	6,2	225	do.	3¾ h	19,3	2,8	25′	210	4,7
32	— 0,8	—	—	0,0832	6,1	235	do.	3½ h	31,7	1,6	2½ h	—	3,3
33	— 0,8	—	—	0,0762	5,9	235	do.	3½ h	30,0	1,6	2½ h	—	3,2
37	— 0,8	19,0	17,5	0,0644	5,7	255	do.	2¾ h	22,2	—	19 h	200	4,9
39	— 1,0	—	—	0,097	6,0	225	Luft	—	20,0	—	20′	—	5,0
40	—	18,0	17,5	0,098	5,9	225	do.	—	18,3	—	20′	—	4,8
41	— 0,8	18,5	18,0	0,0742	4,7	225	trockne Röhre	4½ h	24,5	—	16 h	—	3,8

Temperatur des konstanten Kühlbades erreicht hatte, fand natürlich auch eine Wasserabgabe statt und wohl unter denselben Bedingungen, wie soeben erwähnt. Der so stattgefundene Wasserverlust lässt sich auf Grund der früheren Versuche ungefähr abschätzen: Es dürften oberhalb 0° C. in 10 Minuten eine Wassermenge von etwa 10 % des Muskelgewichts abgegeben worden sein.

bb) Austrocknung des gefrorenen Muskels in lufthaltigen und trocknen Gefässen über P_2O_5.

Versuch 21. 30. Juni 1916. Sartorius R. arvalis. Zimmertemperatur 20° C. Froschtemperatur 19° C. Gewicht des Muskels = 0,07 g. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A. 230. Zuckungshöhe (sechsfache Vergrösserung) = 5,8 cm.

10 h 40′. Der Muskel wird in das konstante Kühlbad versenkt, in vorgekühlter Röhre über P_2O_5 hängend.

3 h 10′. Der Muskel wird herausgenommen und in ein Wägefläschchen gebracht; die Besichtigung des Muskels ergab, dass er gefroren war.

3 h 15′. Der Muskel ist jetzt völlig aufgetaut; Reizung erfolglos. Gewicht des Muskels = 0,0326 g. Gewichtsverlust beträgt demnach 53,4 %. Jetzt wird der Muskel in Ringer-Lösung versenkt.

3 h 55′. Nach 30 Minuten hat der Muskel sich etwas erholt. Zuckungshöhe (sechsfache Vergrösserung) 0,6 cm. Reizschwelle bei R.-A. 180.

(Tabelle 4 siehe S. 39.)

Das Ergebnis des Versuches 21 und derjenigen der Tabelle 4 ist gleich dem, das cet. par. ohne Anwendung von Phosphorpentoxyd als Austrocknungsmittel gewonnen wurde. Nur fand unter der Einwirkung des P_2O_5 im allgemeinen die Wasserentziehung schneller statt. Bei ca. 29 % bis 35 % Gewichtsverlust war hier die Zuckungshöhe des Muskels nach Erholung in Ringer-Lösung etwa auf die Hälfte der ursprünglichen zurückgegangen (vgl. Tab. 4, Versuch 17 und 27), bei etwa 53 % waren noch Spuren von Erregbarkeit vorhanden (Versuch 14 und 30), und von 62 % Gewichtsverlust an war die letztere irreversibel erloschen (Versuch 23, 24).

2. Gefrieren in feuchter Röhre.

Um die Austrocknung des Muskels noch gleichmässiger zu gestalten, als es in den vorhergehenden Versuchen der Fall war, wurde dafür gesorgt, dass das Präparat vor Eintritt des Gefrierens noch kein Wasser abgeben konnte; also erst im gefrorenen Zustande aus-

Tabelle 4.

Versuch Nr.	Kältebad ° C.	Zimmertemperatur ° C.	Froschtemperatur ° C.	Gewicht des Muskels g	Maxim. Zuckung (Anfangshubhöhe)	Reizschwelle (bei R.-A.)	Mittel zum Austrocknen	Austrocknungsdauer	Gewichtsverlust %	Zeit in Ringer-Lösung zur Erholung	Reizschwelle n. Wasserersatz (bei R.-A.)	Maxim. Zuckung nach Wasserersatz
1	— 0,8	19,5	17,5	0,088	3,5	230	P_2O_5	$3^3/_4$ h	43,2 %	35′	170	—
13	— 0,9	21,0	19,0	0,125	7,1	250	P_2O_5	4 h	45,3 %	30′	80	—
14	— 0,9	21,0	19,0	0,116	7,0	250	P_2O_5	$3^3/_4$ h	53,4 %	20 h	75	—
17	— 0,8	20,0	19,0	0,0872	6,1	240	P_2O_5	$4^1/_4$ h	34,6 %	11 h	220	2,8
18	— 0,8	20,0	19,0	0,0862	—	210	P_2O_5	4 h	35,8 %	11 h	180	1,5
19	— 0,8	21,5	19,0	0,0842	3,0	220	P_2O_5	$3^1/_2$ h	35,8 %	14 h	180	—
20	— 0,8	21,5	19,0	0,08	3,4	205	P_2O_5	$3^3/_4$ h	33,0 %	14 h	150	—
21	— 0,8	19,0	17,0	0,1412	7,1	240	P_2O_5	4 h	30,0 %	$5^1/_2$ h	155	—
23	— 0,8	19,0	17,0	0,0588	4,5	225	P_2O_5	5 h	62,0 %	16 h	keine Zuckung	—
24	— 0,8	19,0	17,0	0,0572	4,1	210	P_2O_5	5 h	68,4 %	16 h	do.	—
26	— 0,8	—	—	0,15	7,8	225	P_2O_5	3 h	33,3 %	$11^1/_2$ h	210	2,7
27	— 0,8	—	—	0,1352	7,8	245	P_2O_5	$2^3/_4$ h	28,8 %	25′	205	3,8
30	— 0,8	18,5	17,0	0,1138	6,5	225	P_2O_5	$3^3/_4$ h	52,6 %	10′	—	kaum messbar

getrocknet wurde. Zu diesem Zwecke wurde der Muskel zunächst in einer Röhre, in der sich etwas destilliertes Wasser befand, und die mit feuchtem Filtrierpapier ausgekleidet war, frei hängend mittels des Beckmann'schen Apparates zum Gefrieren gebracht. Durch ein Fenster in dem Filtrierpapierbelag konnte beobachtet werden, wann der Muskel gefroren war, während sich eine etwaige Unterkühlung desselben aus der am Thermometer abgelesenen Temperatur erkennen und abschätzen liess. In einzelnen Versuchen wurde auch der Abkühlungsverlauf in der oben geschilderten Weise genauer verfolgt, indem der Muskel um das Thermometergefäss herumgelegt wurde. War der Muskel gefroren, so wurde er rasch in die zu seiner Austrocknung dienende Röhre übergeführt. Dies war eine trockene Röhre von denselben Dimensionen wie die vorher gebrauchte; an ihrem Boden befanden sich zum Zwecke schärferen Austrocknens etwa 3 bis 5 g Phosphorpentoxyd, und sie war in dem konstanten Kältebad von — 0,8 ° C. bis — 1,2 ° C., in das der Muskel nunmehr gebracht wurde, schon vorgekühlt. So wurde der gefrorene Muskel nun etwa 4—10 Stunden lang ausgetrocknet. In einem Teil dieser Versuche erfolgte Auftauen, Nachbehandlung und weitere Untersuchung des Muskels im wesentlichen ebenso wie in den vorhergehenden Versuchen; in einer letzten Gruppe von Versuchen wurde dagegen das Auftauen und die Erholung des Muskels in etwas anderer Weise bewerkstelligt: Nachdem dem gefrorenen Muskel eine bestimmte grössere Wassermenge entzogen worden war, wurde er im gefrorenen Zustande in eine auf — 1 ° C. unterkühlte, zum Teil von reinem Sauerstoff durchströmte Ringer-Lösung gebracht, die sich nun samt dem Muskel langsam auf Zimmertemperatur erwärmte. Hierbei gingen wir von der Überlegung aus, dass der Muskel, dem man den grössten Teil seines Wassers durch Gefrieren beiseite schaffen kann, ohne ihn erheblich zu schädigen, vielleicht auch die vorübergehende Herausbeförderung dieses Wassers bezw. Eises gut ertrüge, wofern man ihm dieses bei derselben niedrigen Temperatur, bei der es ihm (als Eis) entzogen worden war, wieder zuführte. Der Grad der Austrocknung, die der Muskel vorher erfahren hatte, wurde dadurch festgestellt, dass zusammen mit dem Versuchsmuskel der andere Sartorius desselben Frosches unter die gleichen Austrocknungsbedingungen gebracht wurde; dieser Vergleichsmuskel wurde dann im gefrorenen und ausgetrockneten Zustande aus der gemeinsamen Austrocknungsröhre herausgenommen und durch Wägung sein Wasser-

verlust bestimmt, der in Anbetracht der Gleichheit der Muskeln und der Austrocknungsbedingungen auch für den anderen Sartorius angenommen wurde.

aa) Austrocknung in trockner Röhre.

Von diesen Versuchen sei ohne weitere Erläuterung nur das Wesentliche in Form einer Tabelle angegeben, da hier nur geringe Wasserverluste erzielt wurden.

Tabelle 5.

Versuch Nr.	Temperatur konst. Bad ° C.	Zimmertemperatur ° C.	Gewicht des Muskels g	Maximale Zuckung (Hubhöhe)	Im Beckmann zum Gefrieren gebracht	Austrocknungsraum	Austrocknungsdauer	Gewichtsverlust %	Zeit in Ringer-Lösung von −1° C. zur Erholung	Zuckungshöhe (Hubhöhe) des erholten Muskels
44	−0,8	18,5	0,094	5,5	feuchte Röhre	trockene Röhre	6 3/4 h	8	23 h	4,8
48	−0,9	17,5	0,1134	6,4	do.	do.	4 1/2 h	7	15 1/2 h	5,5
50	−1,0	18,0	0,1572	6,7	do.	do.	9 3/4 h	6	15 h	5,0

bb) Austrocknung über P_2O_5.

In dieser Versuchsgruppe wurde dem ausgetrockneten Muskel das verlorengegangene Wasser einerseits nach dem Auftauen, bei Zimmertemperatur, ersetzt, anderseits fand dieser Wasserersatz statt, während der Muskel noch im gefrorenen Zustande erhalten wurde.

α) Der Wasserersatz findet nach dem Auftauen statt. Ein Beispiel diene zur Erläuterung dieser Versuche, deren Ergebnisse im übrigen in Form einer Tabelle mitgeteilt seien:

Versuch 22. 23. Mai 1916. Sartorius von R. arvalis, die seit 7 Tagen im Zimmer gehalten. Zimmertemperatur 18 ° C. Gewicht des Muskels = 0,115 g. Länge desselben = 4,2 cm. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A. 380. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) = 6 cm.

1 h 26′. Der Muskel, in feuchter Röhre hängend, wird im Beckmannschen Apparat zum Gefrieren gebracht; Kältemischung — 15 ° C.

1 h 34′. Muskel ist gefroren, wie sich an seinem Aussehen mit Sicherheit erkennen lässt. Lufttemperatur in der Röhre = — 3,2 ° C. Demnach war der Muskel auf etwa — 3 ° C. unterkühlt gewesen. (Vgl. oben S. 451). Muskel jetzt rasch in eine vorgekühlte trockene Röhre über P_2O_5 in das konstante Kühlbad von — 1 ° C. versenkt.

9 h 30′. Der ausgetrocknete gefrorene Muskel wird in ein Wägegläschen gebracht und gewogen. Gewichtsverlust = 56,5 %. Der Muskel, der bei unveränderter Länge erheblich schmaler und steifer ist als zuvor, macht den Eindruck ganz gleichmässiger Austrocknung (vgl. oben S. 15). Der inzwischen aufgetaute Muskel wird in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur aufgehängt, bei Durchströmung mit reinem Sauerstoff.

24. Mai 1916.

12 h 00′. Zuckungshöhe des Muskels (bei sechsfacher Vergrösserung) = 0,6 cm.

Tabelle 6.

Versuch Nr.	Temperatur konst. Bad ° C.	Zimmertemperatur ° C.	Gewicht des Muskels g	Maximale Zuckung (Hubhöhe)	Im Beckmann zum Gefrieren gebracht	Austrocknungsmittel	Austrocknungsdauer	Gewichtsverlust %	Zeit in Ringerlösung von Zimmertemperatur zur Erholung	Zuckungshöhe (Hubhöhe) des erholten Muskels
47	- 0,8	18,3	0,0994	5,3	feuchte Röhre	P_2O_5	4 1/2 h	36	21 h	1,4
49	- 0,9	17,5	0.1164	6,6	do.	P_2O_5	3 3/4 h	32	15 h	2,0
53	- 1,0	16,0	0,161	5,5	do.	P_2O_5	4 1/2 h	23	17 1/2 h	2,8
65 [1])	- 1,0	16,5	0,122	4,8	do.	P_2O_5	6 3/4 h	57	18 h	0,4
66 [1])	- 1,0	17,5	0,1364	5,3	do.	P_2O_5	7 1/2 h	64	2 1/4 h	kaum messbar

Bei diesen Versuchen mit sehr gleichmässiger Austrocknung konnten die Muskeln durch Wasserentziehung einen Gewichtsverlust bis 64 % erfahren, ohne die letzten Spuren von Erregbarkeit einzubüssen. Diese war erst bei noch höheren Gewichtsverlusten völlig erloschen.

β) Der Wasserersatz findet statt, während der Muskel noch gefroren ist. Die Überlegung, die zur Ausführung dieser Versuche anregte, wurde oben S. 464 ausgesprochen. Der Verlauf der Versuche war folgender Art:

Versuch 23. 17. Mai 1916. Sartorius von R. arvalis, die seit 8 Tagen im Zimmer gehalten. Zimmertemperatur 16,5 ° C. Froschtemperatur 16 ° C. Gewicht des Muskels 0,124 g. Reizschwelle (Öffnungsinduktionsstrom) bei R.-A. 390. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) = 6 cm.

1) Dies sind die Versuche, die mit dem Kontrollmuskel der in Tabelle 7 befindlichen Versuche 65a und 66a ausgeführt wurden. Vgl. auch S. 41 und S. 43 Anm. 1.

11 h 20′. Muskel, in feuchter Röhre hängend, in den Beckmann'schen Apparat gebracht; Kältemischung — 7,6 ° C.

11 h 31′. Der Muskel ist jetzt gefroren. Lufttemperatur in der Röhre = — 6,2 ° C. Der Muskel war also unterkühlt gewesen. Der jetzt völlig steife und blasse Muskel wird rasch in eine vorgekühlte trockene Röhre über P_2O_5 in das konstante Kühlbad von — 1 ° C. versenkt.

6 h 05′. Der ausgetrocknete Muskel wird in unterkühlte Ringer-Lösung von — 1 ° C. gebracht, um ihn darin zugleich mit der Lösung sich langsam erwärmen zu lassen. Der Gewichtsverlust dieses Sartorius wurde festgestellt nach dem Gewichtsverlust des anderen Sartorius desselben Frosches, der unter denselben Bedingungen und in derselben Röhre vorbehandelt war. Dieser Muskel zeigte einen Gewichtsverlust von 57 %, welcher auch für den Sartorius angenommen wurde, der nachher sofort in unterkühlte Ringer-Lösung kam, ohne vorher gewogen und damit aufgetaut zu sein.

18. Mai 1916.

12 h 20′. Muskel etwas erregbar. Zuckungshöhe (bei sechsfacher Vergrösserung) 0,15 cm.

Tabelle 7.

Versuch Nr.	Kältebad ° C.	Zimmertemperatur ° C.	Gewicht des Muskels g	Maximale Zuckung (Anfangshubhöhe)	Im Beckmann zum Gefrieren gebracht	Austrocknungsmittel	Austrocknungsdauer	Gewichtsverlust %	Zeit in Ringer-Lösung von - 1 ° C. zur Erholung	Zuckungshöhe (Hubhöhe) des erholten Muskels
59	- 1	14,5	0,099	6,0	feuchte Röhre	P_2O_5	8 h	65	12	kaum messbar
61	- 1	16,0	0,07	4,8	do.	P_2O_5	9 h	68	14	nicht erregbar
62	- 1	15,5	0,139	5,1	do.	P_2O_5	$5^1/_2$ h	32	11	3,8
63	- 1	17,0	0,105	6,0	do.	P_2O_5	7 h	37	12	3,3
64	- 1	17,0	0,09	6,1	do.	P_2O_5	$6^1/_2$ h	26	12	4,4
65a[1])	- 1	16,5	0,124	4,8	do.	P_2O_5	$6^3/_4$ h	57	18	0,15
66a[1])	- 1	17,5	0,1362	5,1	do.	P_2O_5	$7^1/_2$ h	64	$2^1/_4$	nicht erregbar

Die übrigen in dieser Weise ausgeführten Versuche sind in der vorstehenden Tabelle 7 zusammengestellt.

Diese letzte Gruppe von Versuchen lehrt, dass ein ausgetrockneter Muskel, dem das verlorengegangene Wasser wieder ersetzt wird, während er noch gefroren ist, sich nicht besser erholt als ein Muskel, der erst nach dem Auftauen in Ringer-Lösung von Zimmertemperatur gebracht wird.

1) Vgl. S. 42 Anm. 1.

F. Zusammenfassung.

1. An freier Luft und bei Temperaturen oberhalb 0° C. lässt sich ein Sartorius nicht genügend gleichmässig austrocknen, um Aufschluss über die gestellten Fragen zu geben.

2. Dasselbe gilt für die Austrocknung in abgeschlossenen trocknen Räumen und solchen von verschiedenem konstanten Dampfdruck, bei Temperaturen oberhalb 0° C.

3. Es werden beiläufig einige Beobachtungen über den Dampfdruck des Muskels gemacht, die auf Werte nahe denen des destillierten Wassers hinweisen.

4. Eine sehr gleichmässige Austrocknung des Muskels in jedem erforderlichen Grade lässt sich erreichen, wenn man das Präparat im gefrorenen Zustande bei etwa —1° C. mehrere Stunden lang über Phosphorpentoxyd austrocknet.

5. Nachdem der Einfluss einiger mitwirkender Faktoren festgestellt war, werden mittels des genannten Austrocknungsverfahrens, das in verschiedener Weise variiert wird, folgende Ergebnisse erzielt:

a) Ein Wasserverlust von etwa **20** % des Muskelgewichts führt zu einer mässigen Verminderung der Leistungen des Muskels, die aber nach Wasserersatz durch Ringer-Lösung ihre ursprüngliche Höhe fast vollständig zurückgewinnen.

b) Bei einem Wasserverlust von **43—46** % seines Gewichts wird der Muskel reversibel unerregbar und erhält bei Wasserzufuhr seine Leistungsfähigkeit etwa zur Hälfte wieder; es ist also trotz der durch den Wasserverlust bedingten Unerregbarkeit seine Lebensfähigkeit so weit erhalten geblieben.

c) Ein Wasserverlust von etwa **57—64** %[1]) des Muskelgewichts lässt von der so verlorengegangenen Erregbarkeit nach Wasserzufuhr nur noch kleine Reste zurückkehren; also auch die Lebensfähigkeit ist nach dem genannten Wasserverlust fast erloschen.

d) Dieser geringe Grad der Erholung ist derselbe, gleichgültig ob einem so stark ausgetrockneten Muskel das Wasser erst nach dem Auftauen oder noch im gefrorenen Zustande ersetzt wird.

e) Nach einem Wasserverlust über **65—68** % seines Gewichts ist die Erregbarkeit des Sartorius irreversibel verschwunden, also sowohl die Lebenstätigkeit als auch die Lebensfähigkeit.

---

1) Das wäre also ein Verlust von 71,5—80 % des gesamten Wassers des Froschmuskels, wenn wir dieses zu 80 % des Muskelgewichtes rechnen, s. oben S. 7.

6. Bezüglich des Einflusses der in 5. berührten mitwirkenden Faktoren ist folgendes ermittelt worden:

a) Ein Sartorius, der ohne Wasserverlust etwa 9 Stunden im gefrorenen Zustande bei ca. — 1 ° C. gehalten wurde, ist zwar nach dem Auftauen unerregbar, erholt sich aber in Ringer-Lösung wieder zur ursprünglichen Erregbarkeit und Leistungsfähigkeit.

b) Dasselbe gilt für Sartorien, die während derartig langer Zeit im unterkühlten Zustande bei ca. — 1 ° C. verharrt hatten.

c) Ein 52stündiges Verweilen des Sartorius in unterkühlter Ringer-Lösung von — 1 ° C. hat keine schädigende Wirkung.

Lebenslauf.

In meinem Heimatsort Amsterdam kam ich 1894 auf die Schule (Lagere School) und 1901 auf die Oberrealschule (Hoogere Burgerschool met 5 j. c.), die ich 1907 verließ, um mich nach bestandener Aufnahmeprüfung an der Oberrealschule zu Antwerpen näher mit der französischen Sprache zu befassen. 1908 begab ich mich nach London und bestand dort September 1909 die Aufnahmeprüfung an der Universität.

Michaelis 1909 wurde ich immatrikuliert an der Georg-August-Universität zu Göttingen und in der medizinischen Fakultät in skribiert. Herbst 1910 ließ ich mich an der Universität Groningen (Holland) immatrikulieren. Dort beschäftigte ich mich bis Ostern 1911 hauptsächlich mit dem Studium der Physiologie und Psychologie und wurde dann von neuem in Göttingen immatrikuliert, wo ich bis zum Abschluß meiner Studien verblieb.

Die Ferien benutzte ich zu größeren Studienreisen nach Frankreich, England und den skandinavischen Ländern. In Stockholm war ich an der physiologischen Abteilung des Karolinischen Instituts unter Prof. J. Johansson längere Zeit tätig. Im Winter 1914—15 arbeitete ich unter Prof. Uffenorde an dessen Klinik für Kriegsverwundete zu Göttingen.

Ich besuchte die Vorlesungen, Kliniken und Practica folgender Herren:

Groningen: Hamburger, Heymans, van Wyhe, Reddingius;

Göttingen: Wallach, Riecke, Ehlers, Berthold, Merkel, Voit, Heiderich, Hauschild, Jensen, Kaufmann, Hirsch, Lichtwitz, Port, Oehme, Stich, Fromme, Creite, Rosenbach, Jung, Schultze, Eichelberg, Uffenorde, A. v. Hippel, E. v. Hippel, Reichenbach, Damsch, Göppert, Lochte.

Allen meinen verehrten Lehrern bin ich zu stetem Dank verpflichtet.

Pierersche Hofbuchdruckerei Stephan Geibel & Co. in Altenburg.